

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ
UNIVERZITA OSTRAVA**

Hornicko – geologická fakulta

Inštitút geoinformatiky

**Využitie radarovej interferometrie k vyhodnoteniu
zmien terénu po povodniach v roku 1997**

**Usage of Radar Interferometry for terrain change
Detection after floods in 1997**

Diplomová práca

Autor:

Bc. Andrea Tkáčiková

Vedúci semestrálnej práce:

Ing. Milan Lazecký

Ostrava 2010

Za cenné rady, pripomienky a odborné konzultácie v danej oblasti, za vždy pozitívny a trpezlivý prístup obzvlášť ďakujem vedúcemu diplomovej práce Ing. Milanovi Lazeckému. Moje poďakovanie patrí aj Ing. Markéte Hanzlovej, ktorá mi ochotne poskytla konzultácie a odborné rady a taktiež Ing. Janovi Růžičkovi Ph.D., ktorý mi pomohol vyriešiť technické problémy so softwarom.

Autorské prehlásenie

- ***Celú diplomovú prácu vrátane príloh som vypracovala samostatne a uviedla som všetky použité podklady a literatúru.***
- ***Bola som zoznamovaná s tým, že na moju diplomovú prácu sa plne vzťahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, najmä § 35 – využitie diela v rámci občianskych a náboženských obradov, v rámci školských predstavení.***
- ***Beriem na vedomie, že Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava (ďalej len VŠB-TUO) má právo neziskovo, k svojej vnútornej potrebe, diplomovú prácu využívať (podľa § 35 odst. 3).***
- ***Súhlasím s tým, že jeden výtlačok diplomovej práce bude uložený v Ústrednej knižnici VŠB-TUO k prezenčnému nahliadnutiu a jeden výtlačok bude uložený u vedúceho diplomovej práce.***
- ***Súhlasím, že údaje o diplomovej práci obsiahnuté v abstrakte budú zverejnené v informačnom systéme VŠB-TUO.***
- ***Zároveň súhlasím s tým, že kompletný text diplomovej práce bude publikovaný v materiáloch zaisťujúcich propagáciu VŠB-TUO, vrátane príloh časopisov, zborníkov z konferencií, seminárov a pod. Publikovanie textu práce bude prevedené v obmedzenom rozlíšení, ktoré bude vhodné len pre čítanie a neumožní prípadnú transformáciu textu a ďalších súčastí práce do podoby potrebnej pre ich ďalšie elektronické spracovanie.***
- ***Bolo zjednané, že s VŠB – TUO, v prípade záujmu z ich strany, uzatvorím licenčnú zmluvu s oprávnením použiť dielo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.***
- ***Bolo zjednané, že použiť svoje dielo – diplomovú prácu alebo poskytnúť licenciu k jej využitiu môžem len so súhlasom VŠB – TUO, ktorá je oprávnená v takom prípade odo mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB – TUO na vytvorenie diela vynaložené (až do ich skutočnej výšky).***

V Ostrave dňa 10.5. 2010

Bc. Andrea Tkáčiková

Andrea Tkáčiková

Vyšná Korňa 105

02321 Korňa

SR

ANOTATION OF THESIS

The thesis deals with SAR interferometry data processing with special attention to terrain changes occurred after floods in summer 1997. The main objective is focused on vertical terrain changes induced by flood event using DInSAR method. The area of interest is known for land subsidence cause by mining activity and it is desirable to find out whether there are traces of surface displacement connected to floods. It's relatively young scientific discipline and can be limited by many aspects (the area of interest with its specific terrain characteristics). The area of interest represents Ostrava and Karvina municipality with their surrounding area. The *ERS-1* and *ERS-2* data were obtained from the European Space Agency (ESA) through Category 1 project C1P.4578 'Surveillance of Man-induced Terrain Changes Using EO Data'. The data cover years 1996, 1997, 1998 with 35 days observation period. DInSAR processing was performed using the DORIS (Delft University open-source software).

Keywords: DInSAR, ERS-1, ERS-2, inteferometry, DORIS Software, floods

ANOTÁCIA DIPLOMOVEJ PRÁCE

Diplomová práca sa zaoberá využitím radarovej interferometrie k posúdeniu zmien terénu po povodniach v roku 1997. Práca sa zaoberá predovšetkým využitím diferenčnej interferometrie, ktorá sa sústreďuje na oblasti sledovania poklesov zemského povrchu a náhle posuny vyvolané povodňovou činnosťou. Záujmová oblasť je známa mnohými poklesmi pevniny, ktoré sú zapríčinené banskou činnosťou a preto je potrebné zistiť, či sú tu viditeľné stopy po posuvoch terénu spojené s povodňami. Táto metóda je relatívne mladá vedecká disciplína, ktorá využíva radarové družicové snímky k určovaniu veľkosti posunov terénu a môže byť obmedzená mnohými aspektmi (napr. záujmová oblasť so špecifickými topografickými charakteristikami). Záujmovú oblasť reprezentujú samosprávne kraje Ostrava a Karvina a ich okolie. Vstupnými dátami sú radarové snímky z družíc ERS-1 a ERS-2, získané od Európskej Vesmírnej Agentúry (ESA) v kategórii 1 projektu C1P.4578 'Surveillance of Man-induced Terrain Changes Using EO Data. Ide o interferometrické páry z rokov 1996, 1997 a 1998. Na vyhodnotenie výsledkov bol použitý open – source software Doris.

Kľúčové slová: DInSAR, družice ERS-1, ERS-2, interferometria, program Doris, povodne

OBSAH

OBSAH	6
ZOZNAM SKRATIEK.....	9
1. ÚVOD	10
2. CIELE PRÁCE.....	11
3. METODIKA SPRACOVANIA	12
3.1 Význam spracovania projektu	12
3.2 Hodnotenie použitých zdrojov	12
3.3 Popis použitých metód a programových prostriedkov.....	13
4. VŠEOBECNÝ POPIS RADAROVÝCH DÁT.....	14
4.1 Radarové dáta	14
4.2 Radar	14
4.3 Družice	15
4.4 Geometrické charakteristiky radarových dát	16
4.4.1 Zmena mierky v priečnom smere	17
4.4.2 Pozičné chyby v polohe objektov	17
4.4.3 Efekt paralaxy	18
5. ZÁKLADNÉ PRINCÍPY RADAROVEJ INTERFEROMETRIE	19
5.1 SAR interferometria.....	20
5.2 SAR snímky.....	21
5.3 Interferogram.....	21
5.4 Základná geometria	22
5.5 Konfigurácia a metódy radarovej interferometrie	23
6. CHARAKTERISTIKA SKÚMANEJ OBLASTI.....	25
6.1 Vymedzenie skúmanej oblasti	25
6.2 Situácia v oblasti v čase povodne	26
6.3 Poveternostné podmienky	28
7. VÝBER VHODNÝCH RADAROVÝCH DÁT.....	29
7.1 Výber radarových snímkov	29
7.2 Spracovanie radarových záznamov.....	36
8. TVORBA INTERFEROMETRICKÝCH PRODUKTOV	38
8.1 Základné charakteristiky spracovania	38

8.1.1	Vstupné súbory (input files)	38
8.1.2	Výstupné súbory (output files)	39
8.2	READFILES	40
8.3	PORBITS	40
8.4	CROP	41
8.5	M_SIMAMP	42
8.6	M_TIMING	43
8.7	OVS	44
8.8	Koregistrácia zdrojových radarových snímok	44
8.8.1	COARSEORB	45
8.8.2	COARSECORR	46
8.8.3	M_FILTAZI	46
8.8.4	S_FILTAZI	47
8.8.5	FINE	47
8.9	Interpolácia a prevzorkovanie	48
8.9.1	RELTIMING	49
8.9.2	DEMASSIST	49
8.9.3	COREGPM	49
8.9.4	RESAMPLE	50
8.9.5	FILTRANGE	51
8.10	Komplexný interferogram	52
8.10.1	INTERFERO	52
8.10.2	COMPREFPHA	52
8.10.3	SUBTRREFPHA	53
8.10.4	COHERENCE	54
8.11	Výpočet DMT	55
8.11.1	COMPREFDEM	56
8.11.2	SUBTRREFDEM	56
8.12	FILTPHASE	56
8.13	Rozbalenie interferometrickej fázy	57
8.14	SLANT2H	57
8.15	GEOCODE	58
8.16	DinSAR	58
8.17	Kvalita DMT z tandem párov	58
8.18	POSTPROCESING	59
9.	VYHODNOTENIE INTERFEROMETRICKÉHO SPRACOVANIA	60
10.	AMPLITÚDA SNÍMKOV	73
11.	INTEGRÁCIA VÝSLEDKOV DO GIS	81

12. POUŽITÉ SOFTWARE NÁSTROJE	85
12.1 DORIS Software.....	85
12.2 DESCW Software	86
12.3 SNAPHU	86
12.4 Google Earth	86
12.5 NEST Software	87
12.6 ArcGIS Software	87
13. ZÁVERY SPRACOVANIA	88
14. SUMMARY.....	89
15. POUŽITÁ LITERATÚRA A ZDROJE.....	90
16. ZOZNAM TABULIEK	94
17. ZOZNAM OBRÁZKOV.....	95
18. ZOZNAM PRÍLOH	97

ZOZNAM SKRATIEK

České a slovenské skratky

DMT	Digitálny Model Terénu
DPZ	Diaľkový Prieskum Zeme
VD	Vodné dielo

Cudzojazyčné skratky

DEOS	Delft Institute for Earth-Oriented Space research
DESCW	Display Earth remote sensing Swath Coverage for Windows
DInSAR	Diferential Interferometry Synthetic Aperture Radar
DORIS	Delft Object-oriented Radar Interferometric Software
ERS-1	European Remote Sensing satellite-1
ERS-2	European Remote Sensing satellite-2
ESA	European Space Agency
GMT	Generic Mapping Tools
GCP	Ground Control Points
NEST	Next ESA SAR Toolbox
PROJ	Cartographic Projections Library
RADAR	RADio Detecting And Ranging
SAR	Synthetic Aperture Radar
SLAR	Side Looking Airborne Radar
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
UTM	Univerzálny transversálny Mercatorov systém súradníc

1. ÚVOD

Diplomová práca sa zaoberá radarovou interferometriou, konkrétne vyhodnotením zmien terénu po povodniach na území Moravskoslezského kraja v roku 1997. V prvej časti sú popísané všeobecné princípy tejto metódy, jej použiteľnosť ako aj spôsob spracovania radarových dát.

V dnešnej dobe patria družicové snímky neodmysliteľne k bežným informačným zdrojom a sú cenným zdrojom priestorových a časových dát. Získavajú sa bezkontaktným spôsobom umelými družicami, umiestnenými na rôznych obežných dráhach Zeme. Základom získavania radarových dát je prenos informácií pomocou elektromagnetického žiarenia.

Družice nám umožňujú periodické získavanie týchto dát, čo má veľký význam pre sledovanie určitých javov v čase. Práve periodicita získavania radarových dát umožňuje sledovať zmeny terénu zemského povrchu po povodniach, čo je hlavnou úlohou práce.

Druhá časť sa bližšie zaoberá spracovaním fázových meraní z dvoch a viac súborov radarových dát. Výhodou metódy je, že umožňuje získať pomerne rýchlo veľké množstvo dát. Po zvážení času, ktorý je potrebný na naplánovanie vyslania družice a realizáciu snímania, je na získanie dát potrebný len malý časový okamih. Jednou z možností je využitie interferencie koherentného mikrovlnného žiarenia emitovaného radarovými aparatúrami na družiciach pre tvorbu modelu zemského povrchu a pre určovanie zmien tohto modelu v čase.

2. CIELE PRÁCE

Cieľom práce je predovšetkým zoznámiť sa s radarovou interferometriou. Táto metóda pojednáva o možnostiach a o stále rozsiahlejšom využívaní aktívneho snímania v diaľkovom prieskume Zeme. Ide predovšetkým o využívanie tzv. SAR radarov (Synthetic Aperture Radar, [45]), čo je typ radaru, ktorý sníma dáta z povrchu zeme pomocou merania nie len času a amplitúdy signálu, ale aj frekvencie a fázy žiarenia. Je to ďalšia generácia radarov, ktorá rieši problém rozlíšenia v smere letu.

Na základe radarovej interferometrie vybrať vhodné interferometrické páry z rokov 1996, 1997 a 1998, ktoré znázorňujú situáciu vo vybranej časti skúmanej oblasti pred povodňami a po povodniach v júli 1997.

Pomocou metódy too-pass D-InSAR (dvojobletová interferometria) a three-pass D-InSAR (trojobletová interferometria) vytvoriť interferogramy skúmanej oblasti. Táto metóda nám umožňuje napr. topografické mapovanie s relatívnou presnosťou 10 – 15 m (to je závislé na presnosti merania dráhy satelitu), deformačné mapovanie s presnosťou pod 1 cm (to je závislé na veľkom množstve faktorov vyplývajúcich z vlastností povrchu zeme, atmosféry a snímaných dát) a ďalšou možnosťou využitia je tiež tematické mapovanie založené na detekcii zmien.

Z vytvorených interferogramov zistiť vertikálne zmeny povrchu terénu. Projekt je zameraný na monitoring zmien zemského povrchu vplyvom povodní v Moravskoslezskom kraji. Čiastkovou úlohou je tiež zameranie sa na konkrétne územie v oblasti miest Ostrava a Karviná, čo sú oblasti s poddolovaným územím.

V projekte bude použité veľké množstvo dát z jednotlivých krokov spracovania pre všetky tri roky a tým vznikne veľké množstvo produktov (interferogramy, DMR). Tieto výsledky bude potrebné integrovať do GIS a tým je definovaná ďalšia, záverečná, úloha a to je vytvoriť geografickú databázu výsledkov.

3. METODIKA SPRACOVANIA

Nasledujúca kapitola vysvetľuje význam spracovania diplomovej práce a venuje sa popisu použitých zdrojov, metód a postupov, ktoré boli použité pre riešenie úloh práce.

3.1 Význam spracovania projektu

Hlavným dôvodom spracovania projektu je monitorovanie povodňových oblastí interferometrickou metódou. Povodne sú z hydrologického, meteorologického, vodohospodárskeho a ekologického hľadiska fenomén, ktorý odjakživa sprevádza ľudstvo. Vznik povodne podmieňuje súbeh viacerých okolností. Okrem geologických a geografických pomerov je to takmer vždy zvláštny vývoj počasia, zrážok a teplôt nad veľkým územím. K tomu sa priradujú ďalšie faktory ako nasýtenosť podložia vodou, snehová pokrývka, počiatkové prietoky, prekážky vytvorené činnosťou človeka. Ako uvádza [43], povodeň je katastroficky prírodný jav, spôsobený rozliatím nadmerného množstva vody v krajine mimo koryta riek. Ich následky môžu byť rôzne veľké škody na majetku, ekologické škody či obeť na ľudských životoch. K podobným katastrofickým prírodným javom patrí aj sucho, búrky, tornáda, zemetrasenia alebo výbuchy sopiek. Vyskytuje sa náhodne v čase a priestore, čo sťažuje možnosť jej dlhodobej predpovede. Povodne predstavujú viac ako 30% všetkých prírodných rizík na celom svete a polovicu úmrtí spôsobených prírodnými katastrofami.

Povodne predstavujú relevantný problém, pretože väčšina zastavaného územia a najproduktívnejších oblastí leží v údoliach alebo všeobecnejšie v nízko položených oblastiach. Človek nevie ovplyvniť veľkosť a časový priebeh povodní. S vedomím, že povodne boli, sú a budú sa musí usilovať o znižovanie povodňových rizík na najnižšiu možnú mieru. Vzhľadom na dostupnosť veľkého počtu dát DPZ a na posledný vývoj v oblasti spracovania obrazu možno radarové snímanie považovať za účinný nástroj pre monitorovanie životného prostredia a najmä pri hodnotení povodňových škôd. Spomedzi všetkých senzorov, ktoré by mohli byť použité pri monitorovaní povodní sa Synthetic Aperture Radar (SAR) zdá byť najvhodnejším nástrojom pre sledovanie tohto typu udalostí, najmä ak sa pre spracovanie používajú interferometrické techniky.

3.2 Hodnotenie použitých zdrojov

Prvým krokom spracovania diplomovej práce bolo štúdium odbornej literatúry zameranej všeobecne na DPZ a na jeho metódy spracovania radarových snímok, literatúry

zameranej na radarovú interferometriu, metódy a postupy spracovania radarových dát v určenom software ako aj postupy pri tvorbe konečných produktov.

Problematikou DPZ, radarí a radarovými snímkami sa v súčasnosti zaoberá dostatočné množstvo zdrojov, najmä starších publikácií. Ucelenú podobu informácií uvádza skriptum od RNDR. Petra Dobrovoľného CSc [3], ktoré som podrobne preštudovala. Jednou z oblastí DPZ je radarová interferometria, ktorá je pomerne mladým, zatiaľ menej známym odvetvím DPZ. Všeobecný prehľad o radarovej interferometrii mi poskytli slovenské, české a zahraničné publikácie, skriptá a rôzne práce Doc. Ing. Leny Halounovej, CSc. [9] a [10], Ing. Ivany Hlaváčovej [12] a Ing. Barbory Knechtlovej [19] z ČVUT v Prahe, kde sa tejto problematike venujú v oveľa väčšom rozsahu. Konkrétne postupy analýzy dát však neboli načrtnuté v žiadnej publikácii. Veľmi cenným pomocníkom pri tvorbe interferogramov a všetkých ostatných produktov radarových snímk boli cudzojazyčné publikácie B. M. Kampesa [15] a [16], R. F. Hanssena [11] a P. Marinkovica [16] ako aj technická dokumentácia k programu Doris [25]. Pre získanie najnovších a špecifických informácií o radarovej interferometrii som sa zamerala na vyhľadávanie na internete. Našla som dostatočné množstvo publikácií v elektronickej podobe, avšak habilitačné, dizertačné práce, rôzne články v odborných časopisoch, referáty z konferencií a pod. sú podľa môjho názoru dôveryhodnejšie ako informácie publikované na stránkach komerčných firiem, a týmto pravidlom som sa aj riadila. Navyše viaceré články publikované na internete mali často zaujímavý, ale málo odborný obsah. Preto sa základom mojej diplomovej práce stali najmä zahraničné diplomové a dizertačné práce, technické dokumentácie a manuály k jednotlivým programom.

3.3 Popis použitých metód a programových prostriedkov

V práci používam a vychádzam z už spomenutých zahraničných publikácií a technických dokumentácií, ktoré mi poskytli všeobecný prehľad. Z publikácií tiež čerpám niektoré teoretické znalosti a princípy.

Pre vytvorenie textovej dokumentácie bol použitý program MS Word. Konečné spracovanie výsledkov pre ich názornú publikáciu a vhodnú vizualizáciu v diplomovej práci som vytvorila pomocou programového balíka GIMP 2.4.5. a IrfanView 4.0. V praktickej časti práce používam programové produkty, ktorých charakteristiku a podrobný popis obsahuje *kap. 9. POUŽITÉ SOFTWARE NÁSTROJE*. Všeobecne ide o open – source produkt DORIS Software, DESCW Software, Software NEST DAT a GoogleEarth.

4. VŠEOBECNÝ POPIS RADAROVÝCH DÁT

Radarová interferometria vychádza z merania zemského povrchu radarovými aparatúrami a preto je pre pochopenie ďalšieho textu potrebné pripomenúť základné vlastnosti radarových dát. Podľa [3] na rozdiel od skenerov alebo fotografických kamier, ktoré pracujú v optickom obore spektra a merajú odrazené slnečné žiarenie alebo žiarenie vyžarované Zemou, sú radarové aparatúry vybavené vlastným zdrojom žiarenia.

Radar používa mikrovlnné žiarenie s vlnovou dĺžkou 1 mm až 1 m. Pri oveľa nižšej frekvencii použitého žiarenia dochádza k získavaniu dát aj cez hmlu, oblaky, či mierny dážď. Radarové vlny tiež prenikajú porastom, do pôdy alebo do snehovej pokrývky, čím dovoľujú získavať informácie i o podpovrchovej vrstve. Geometria radarového merania je taktiež odlišná od väčšiny optických meracích prístrojov, pretože sa používa šikmý pozorovací uhol namiesto vertikálneho smeru obvyklého u optických skenerov.

Pre praktické aplikácie sa používajú zobrazovacie radary, pracujúce so syntetickou apertúrou (*Synthetic Aperture Radar* – SAR, [45]). Veľkosť nameranej spätne odrazenej energie sa môže znázorniť v podobe čiernobieleho obrazu. Namerané hodnoty SAR majú väčší dynamický rozsah a sú preto ukladané s rádiometrickým rozlíšením 16 bit (oproti 8 bitom u optických dát).

4.1 Radarové dáta

Radarové dáta sú dáta získané z radarového merania polohy, rýchlosti či tvaru. Radarové družicové dáta predstavujú špecifickú kategóriu dát, ktoré sú získavané v mikrovlnnej časti elektromagnetického spektra. Vďaka tomu môžu byť radarové digitálne obrazové záznamy (ďalej len snímky) získavané v akomkoľvek počasí, vo dne i v noci. Radarové dáta vhodne dopĺňujú štandardné optické dáta najmä v situáciách, kedy klimatické a poveternostné podmienky znemožňujú získavanie iných radarových digitálnych obrazových záznamov.

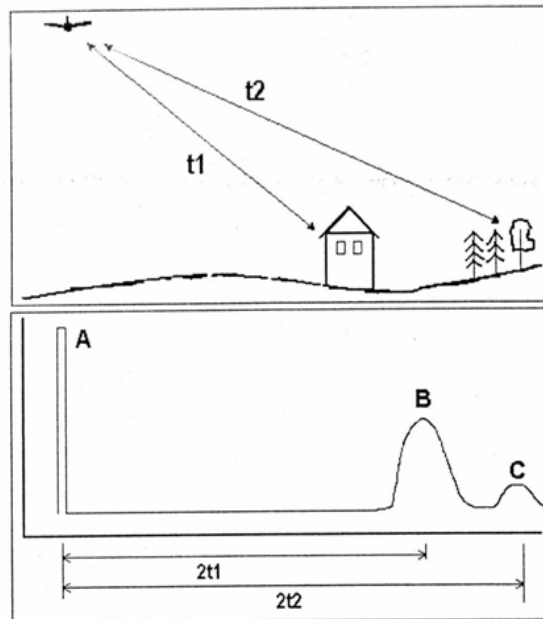
4.2 Radar

Radar je skratkou pre „RADio Detecting And Ranging”. Podľa [3] ide o systém založený na vysielaní krátkeho a intenzívneho mikrovlnného žiarenia určitým smerom a zaznamenávaní časti signálu (tzv. echa), ktorý sa vracia späť po odraze od predmetu na zemskom povrchu. Radarové systémy môžu byť umiestnené na zemskom povrchu, lietadlách

alebo družiciach a podľa schopnosti vytvárať obrazový záznam sa radarové systémy delia na zobrazujúce a na nezobrazujúce.

K nezobrazujúcim systémom patrí napr. Dopplerov radar, ktorý sa používa k zisťovaniu rýchlosti pohybu vozidiel. Inou formou nezobrazujúceho radaru je tzv. PPI radar, ktorý je používaný v radarovej meteorológii, pre navigačné účely a pod.

Ako zobrazujúci radar sa používajú dva systémy. Prvým systémom je radar s reálnou apertúrou (Real Aperture RADAR). Pretože sa tento systém používa iba na lietadlových nosičoch, označuje sa skratkou SLAR (Side Looking Airborne RADAR). Druhým typom je technicky zložitejší radar so syntetickou aparatúrou – SAR (Synthetic Aperture RADAR), ktorý ako nosiče využíva predovšetkým družice. Oba systémy získavajú obrazový záznam po jednej alebo po oboch stranách od dráhy letu nosiča, preto sa označujú tiež ako bočné radary (*Obr. 1. Schematické znázornenie princípu fungovania radaru*). Princíp fungovania bočného radaru je znázornený na obrázku č.1. Mikrovlnné žiarenie je vyslané v krátkom a intenzívnom lúči. Po dosiahnutí lúča na nejaký objekt (napr. budovu) sa lúč od objektu odrazí a vracia sa späť k anténe, ktorá sa medzitým prepne na prijímač. Anténa prijme signál o určitej intenzite. Doba medzi vyslaním signálu a prijatím echa sa meria elektronicky a výsledkom merania je vzdialenosť objektov od radaru.



*Obr. 1. Schéma princípu fungovania radaru,
prevzaté z [3]*

4.3 Družice

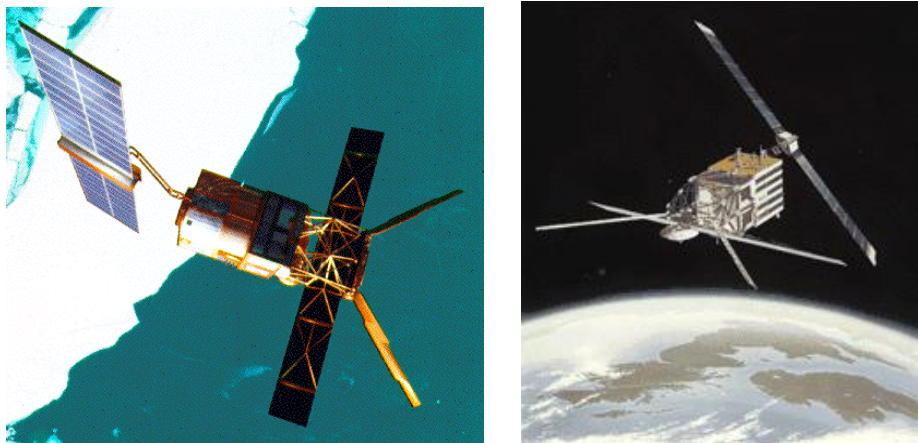
V súčasnosti existuje niekoľko zdrojov radarových družicových dát, ktoré sa využívajú v radarovej interferometrii pre rôzne interferometrické metódy. Ako uvádza [28], ide predovšetkým o družice ERS-1 (jej činnosť bola ukončená v marci 2000 [5]) a ERS-2, prevádzkované Európskou kozmickou agentúrou (ESA [6]), družicu RADARSAT, prevádzkovanú Kanadskou kozmickou agentúrou a družicu ENVISAT, ktorej činnosť taktiež prevádza ESA od roku 2002. Okrem týchto družíc vykonávajú interferometrické merania aj

niektoré kozmické raketoplány (napr. raketoplán Endeavour v roku 2000). Radarové obrazové záznamy spracovávané v rámci diplomovej práce boli nasnímané družicami ERS-1 a ERS-2.

Družica ERS-1 bola vypustená v roku 1991 Európskou kozmickou agentúrou (ESA), prevzaté z [7] a [26]. Pohybuje sa po subpolárnej dráhe vo výške 785 km, pričom rovnaké miesto na zemskom povrchu sníma po 16 až 18 dňoch. Ide o polyfunkčnú družicu, ktorá obsahuje tri základné zariadenia:

- a) AMI (Active Microwave Instrument) – družica SAR pracujúca v C pásme
- b) Radarový alimeter – výškometer snímajúci v pásme K
- c) Pozdĺžne skenujúci infračervený rádiometer

Družica ERS-2 bola vypustená v roku 1994. Technické vybavenie pre snímanie zemského povrchu ako aj parametre obežnej dráhy sú rovnaké ako v prípade družice ERS-1. Obe družice boli na obežnej subpolárnej dráhe posunuté a na určitú dobu pracovali v tandeme.



Obr. 2. Družice ERS-1 a ERS-2, prevzaté zo [7]

4.4 Geometrické charakteristiky radarových dát

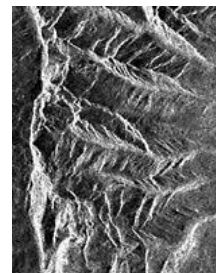
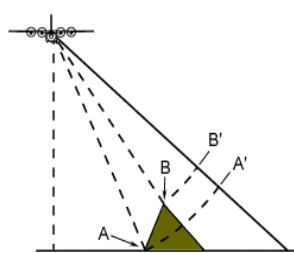
Na základe poznatkov získaných z [3] , môžeme definovať nasledujúce charakteristiky a polohové chyby v radarových dátach. V dôsledku odlišného spôsobu získavania radarových dát je geometria obrazových záznamov získaných SLAR radarom odlišná od geometrie fotografií i obrazových záznamov získaných pasívnym snímaním. To má za následok nasledujúce geometrické charakteristiky.

4.4.1 Zmena mierky v priečnom smere

Bočný radar používa dva spôsoby zaznamenávania radarových dát. Poloha objektov na digitálnom obrazovom zázname môže byť vyjadrená v šikmých vzdialenostiach (slant range), kedy vzdialenosti medzi susednými terénymi tvarmi sú priamo úmerné časovému intervalu medzi jednotlivými prijatými signálmi. Podľa [2] tu dochádza k relatívnym zmenám rozmerov a deformáciám mierky radarového obrazového záznamu oproti skutočným pozemným (horizontálnym) vzdialenostiam (ground range).

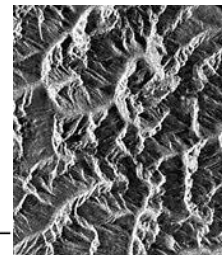
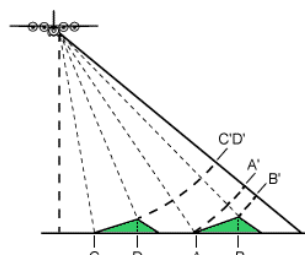
4.4.2 Pozičné chyby v polohe objektov

Radar zaznamenáva vzdialenosti terénnych prvkov od antény, ako udáva [3]. Ak je určitý objekt s vertikálnym rozmerom snímaný mikrovlnným lúčom, lúč dosiahne jeho vrchol skôr ako základňu a taktiež sa signál od vrcholu objektu vráti k anténe skôr ako signál od základne. Objekt sa javí akoby naklonený k línii letu. Výškovito členitý terén sa v závislosti na sklone svahu a uhle dopadu radarového signálu môže zobrazovať s geometrickými distorziami, uvádza [24]. Svahy orientované k línii letu podliehajú efektu zhustenia signálu (*layover*), ktorý znázorňuje obr. 3. Dĺžka svahov je na výslednom zázname výrazne skrátaná.



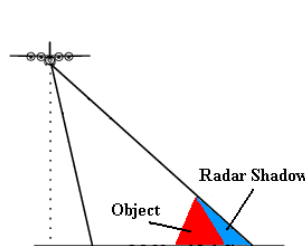
Obr. 3. Zhustenie signálu, prevzaté z [34]

U veľmi strmých svahov radarový signál dosiahne vrchol terénu skôr ako pätu terénu. V tomto prípade je relatívna poloha vrcholu a päty na výslednom snímku prevrátená. Tento efekt sa označuje ako spätné prekrytie signálu (*foreshortening*), zobrazený na obr. 4.



Obr. 4. Spätné prekrytie, prevzaté z [34]

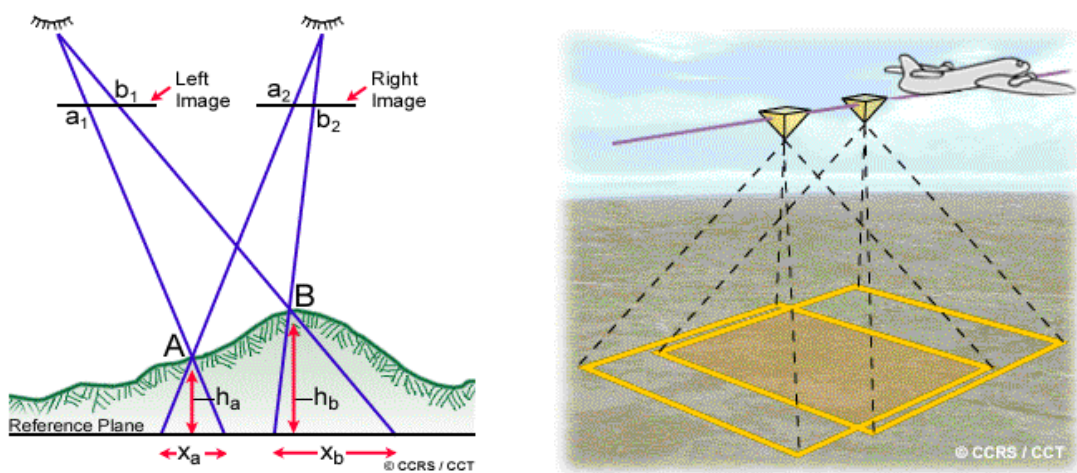
V prípade strmých svahov odvrátených od línie letu vzniká na radarových obrazových záznamoch efekt radarových tieňov (*radar shadow*). Sú to plochy bez dopadajúceho radarového mikrovlnného žiarenia, skryté za vysokými objektmi (Obr.5.) Z oblasti radarového tieňa neprichádza späť k záznamovému zariadeniu žiadny signál.



Obr. 5. Radarový tieň, prevzaté z [34]

4.4.3 Efekt paralaxy

Ak je objekt snímaný dvakrát z dvoch rôznych letových čiar, efekt relatívnej zmeny polohy objektov v dôsledku rôznej nadmorskej výšky umožňuje na obrazovom zázname merať efekt paralaxy, ktorý je podmienkou pre stereoskopické vnímanie. Stereoskopickú dvojicu obrazových snímok získame pri snímaní terénu z dvoch smerov. V dôsledku bočného snímania majú obrazové záznamy veľmi odlišný vzhlľad. Preto sa stereoskopická dvojica získava z rovnakej letovej dráhy, ale z iných letových hladín. (znázornené na *Obr. 6. Efekt paralaxy*).



Obr. 6. Efekt paralaxy, prevzaté z [34]

5. ZÁKLADNÉ PRINCÍPY RADAROVEJ INTERFEROMETRIE

Princípy interferencie elektromagnetického žiarenia sú dobre známe už niekoľko storočí, ale až v prvej polovici 90. rokov 20. storočia sa pojem radarová interferometria začal dostávať do popredia záujmu odborníkov. Práve v tejto dobe zo štartom radarových družíc ERS-1 a ERS-2 bola objavená možnosť aplikovať princípy interferencie mikrovlnného žiarenia i na družicové metódy získavania informácií o priestorovom členení zemského povrchu. Tak vznikol pojem radarová (družicová) interferometria, ktorý skrýva technológiu tvorby DMR Zeme ako aj možnosti, ako merať zmeny tohto modelu v čase. Svojou presnosťou predstavuje táto interferometrická metóda meranie polohových zmien zemského povrchu, známa je tiež pod názvom diferenčná interferometria. Dôležitou súčasťou družicovej interferometrie je získavanie informácií o samotnom polohopise objektov na zemskom povrchu, ktorý obsahujú radarové snímky, z ktorých táto metóda vychádza.

5.1 Základné princípy a pojmy

Základné vlastnosti nesie elektromagnetické žiarenie, ktoré radar vysiela smerom k povrchu Zeme a zaznamenáva odrazy týchto elektromagnetických pulzov, prevzaté z [8]. V odrazenom žiarení je zachytená informácia o fáze a amplitúde vlnenia.

Vlnová dĺžka λ je vzdialenosť medzi dvoma po sebe nasledujúcimi bodmi na vlne, ktoré majú rovnakú amplitúdu a fázu (*Obr. 39. Charakteristika elektromagnetickej vlny*). Vlnové dĺžka sa vypočíta:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

kde λ je vlnová dĺžka v m

v je rýchlosť šírenia vlny v m/s

f je frekvencia vlnenia v Hz.

Amplitúda je maximálna výchylka vlny nad, alebo pod nulovú hodnotu. Táto veličina popisuje silu (intenzitu) vlnenia. Amplitúda odrazeného žiarenia závisí na vlastnostiach povrchu, čo sa využíva pri mapovaní polohy a odrazových vlastností povrchu. Výsledkom je rastrový čiernobiely obraz povrchu, kde odtieň sivej závisí na type povrchu. Povrch s vysokou mierou odrazivosti sa zobrazí ako svetlý a s nízkou ako tmavý.

Fáza je hodnota relatívnej polohy na vlne v určitom čase vzhľadom k počiatku vlnenia a nadobúda hodnotu od $-\pi$ do π , znázornené na Obr. 7. Charakteristika elektromagnetickej vlny. Fáza odrazeného žiarenia je závislá na vzdialenosti medzi zdrojom žiarenia a miestom odrazu a počíta sa podľa vzorca:

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} R_{(zam-zpät)} = \frac{4\pi}{\lambda} R$$

kde ψ je fáza, λ je vlnová dĺžka použitého radarového žiarenia a R je dĺžka medzi satelitom a snímaným bodom.

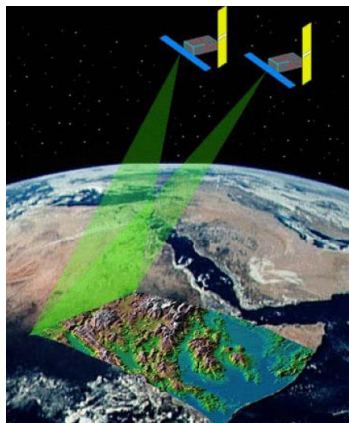


Obr. 7. Charakteristika elektromagnetickej vlny, prevzaté z [8]

5.2 SAR interferometria

SAR interferometria, ako uvádza [38], je v súčasnosti veľmi dynamicky sa rozvíjajúcou metódou, hlavne vďaka výborným výsledkom dosiahnutým v rôznych oblastiach ako napríklad monitorovanie zemetrasení, vulkanickej činnosti, zosuvov a poklesov pôdy, sledovanie dynamiky ľadovcov a v neposlednom rade tvorbe digitálneho modelu terénu (DMT) zemského povrchu a klasifikácii rôznych typov povrchu. Je to metóda, ktorá využíva interferenciu koherentného žiarenia k určovaniu priestorových vzťahov na povrchu Zeme.

SAR – radar so syntetickou apertúrou - je mikrovlnný systém zobrazujúci zemský povrch. Družica vybavená SAR aparátúrou môže nasnímať rovnaké územie pod mierne sa odlišujúcim uhlom pohľadu (Obr. 8. Odlišný uhol snímania radaru). Podľa [4], územie môže byť zosnímané súčasne (dva radary sú súčasťou jedného nosiča, ktorým je napr. raketoplán alebo lietadlo), alebo v rôznom čase využitím faktu, že dráha družice (ERS-2) sa po určitom čase opakuje, alebo že dve družice letia po rovnakom orbite v určitom časovom odstupe (ERS-1, ERS-2). V týchto prípadoch je interval medzi preletmi (pozorovaniami) 1 deň, 35 dní alebo násobok 35 dní.



Obr. 8. Odlišný uhol snímania radaru, prevzaté z [6]

5.3 SAR snímky

SAR digitálny obrazový záznam (SAR snímok) je tvorený pixlami, ktoré sú usporiadané v riadkoch (range, pixel) a stĺpcoch (azimut, line), uvádza [3]. Každý pixel nesie informáciu o fáze a amplitúde, ktorá je zaznamenaná v podobe komplexného čísla. Rozlíšenie pixlu je závislé na vlastnostiach SAR systému. Rozlíšenie býva rozdielne v smere range a azimutu. V range je rozlíšenie dané dĺžkou impulzu, v azimute je závislé na vzdialenosti snímaného územia od radaru a šírke vyslaného impulzu. Ten je určený veľkosťou antény. U SAR radarov je rozlíšenie v smere azimutu zvýšené pomocou Dopplerovského princípu, ktorý umožňuje využiť len úzku časť lúča. V interferometrii sú využívané vždy aspoň dva digitálne obrazové záznamy (*master a slave*).

5.4 Interferogram

Na rozdiel od klasického radarového merania, kde sa meria čas a amplitúda signálu, je nositeľom informácie u SAR interferometrie amplitúda a hlavne fáza žiarenia. Odpočítaním fázových hodnôt zodpovedajúcich si pixlov jedného snímku od druhého získame interferogram. Podľa [38] interferogram je obraz, v ktorom sú jednotlivé pixle hodnotami interferometrickej fázy v rozmedzí $0 - 2\pi$. Obraz je tvorený farebnými interferometrickými prúžkami, ktoré pripomínajú vrstevnice. Dvoma základnými zložkami obsiahnutými v interferograme sú informácie o polohe a členitosti terénu a informácia o jeho deformácii. Voľbou vhodného postupu je možné jednotlivé zložky od seba oddeliť, čím získame buď obraz reliéfu terénu, kde výškový rozdiel medzi dvoma prúžkami závisí na geometrii snímania, alebo obraz časovej deformácie terénu, kde vzdialenosť medzi prúžkami u družíc

ERS je 2.8 cm. Interferometrická metóda umožňuje vytvorenie digitálneho modelu terénu s presnosťou v metroch až desiatkach metrov a určenie deformácií terénu s presnosťou pod 1cm. Presnosť digitálneho modelu terénu a určenia deformácií je závislá na kvalite generovaného interferogramu. Interferogram je ovplyvnený celým radom nežiaducich vplyvov, napríklad atmosférou, chybami dráh družíc, alebo nevhodným typom povrchu, výsledkom čoho môže byť dekorelácia oblasti a obraz znehodnotený šumom. Časť týchto nežiaducich vplyvov sa dá odstrániť vhodným výberom dát, alebo vhodným postupom, výsledný interferogram je však aj napriek tomu vždy zaťažený istým množstvom chýb.

5.5 Základná geometria

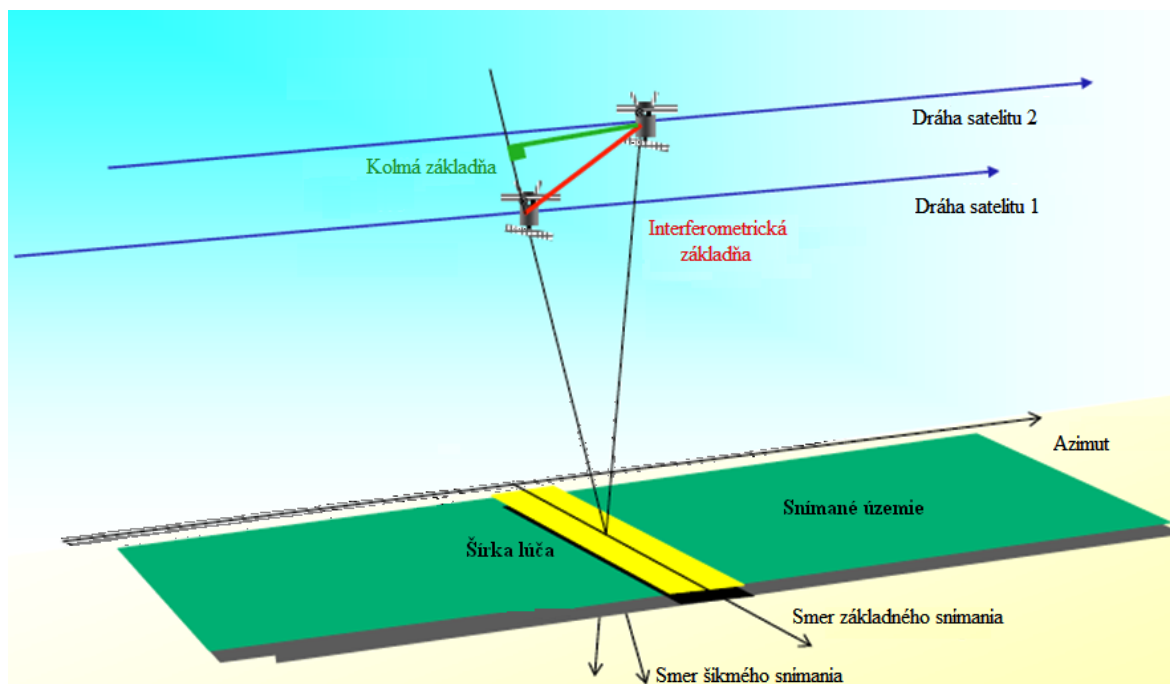
Pre interferometrické spracovanie sú potrebné aspoň dve scény rovnakého snímaného územia, hlavný (master) a vedľajší (slave) digitálny obrazový záznam. Všetky spracovania a výsledky sa vzťahujú k hlavnému (master) snímku.

Vzdialenosť medzi radarom v okamihu snímkovania sa nazýva *interferometrická základňa B* (interferometric baseline), zobrazená na Obr. 9. *Priestorová schéma základných prvkov radarového snímania terénu*. Táto základňa je vždy v rovine kolmej k smeru dráhy družice (vzťahuje sa k družici, z ktorej je získaný hlavný záznam). Ak však dráhy nie sú presne rovnobežné, môže nadobudnúť rôzne hodnoty v jednotlivých miestach snímku. Túto základňu je možné vektorovo rozložiť na dve zložky, a to na *kolmú základňu* (perpendicular baseline) a *dotykovú základňu* (parallel baseline) k radarovému lúču vyslanému v šikmom pohľade.

Kolmá základňa bude nadobúdať kladné hodnoty, pokiaľ družice, získavajúce vedľajší snímok, bude napravo od smeru vysielania lúča družicou, získavajúcou hlavný snímok. Interferometrická základňa sa dá ďalej definovať pomocou horizontálnej základne a vertikálnej základne, prípadne pomocou dĺžky základne a orientačného uhla. Jednotlivé parametre, definujúce interferometrickú základňu, je možné medzi sebou navzájom prevádzať pomocou goniometrických vzťahov, uvádza [38] .

Ďalej sa definuje *časová základňa* (temporal baseline), tj. časový okamih medzi dvoma expozíciami. Pokiaľ je časová základňa veľmi dlhá, tj. medzi získaním prvého a druhého záznamu uplynula dlhšia doba, na zobrazenom povrchu mohlo dôjsť ku zmenám, (napríklad jarné a zimné meranie), a výsledkom je *nízka korelácia* (vysoká dekorelácia) medzi záznamami. Zatiaľ čo zastavané plochy sú v tomto prípade najstabilnejšie, hospodárske

plochy môžu byť dekorelované v závislosti na vegetačnom období a vodnej ploche v akomkoľvek okamihu podľa aktuálneho počasia (napríklad vietor).



Obr. 9. Priestorová schéma základných prvkov radarového snímania terénu, prevzaté a upravené podľa [22]

5.6 Konfigurácia a metódy radarovej interferometrie

Ideálny SAR interferometer sa skladá z dvoch antén vzdialených o pevnú vzdialenosť (interferometrická základňa), uvádza [46]. Obe antény merajú odrazené signály vyslané jediným vysielačom (napr. jednou z antén). V prípade družicových nosičov však nastáva problém, že družica je vždy unikátna, t.j. chýba druhá anténa pre priame meranie. Preto sa prevádza druhé samostatné meranie, ktoré nahrádza túto druhú anténu.

Možné konfigurácie meracích systémov:

- snímanie jedným radarom na rovnakej družici z rovnakej dráhy (časový interval 35 dní)
- snímanie dvoma radarmi pomocou dvoch družíc z rovnakej dráhy (tandem ERS-1/2)

- snímanie jedným radarom s dvoma prijímacími anténami, ktoré sú umiestené v známej vzdialenosti od seba

Na základe vyššie vymenovaných konfigurácií sa rozoznávajú dve základne metódy, podľa [17] a [18]:

- **jednoobletová interferometria (single-pass interferometry)**

Zaznamenáva oba záznamy súčasne s použitím vysielacej/prijímacej antény a druhej prijímacej antény, ktoré sú od seba v určitej vzdialenosti. Táto metóda je obmedzená veľkosťou základne, čo spôsobuje, že meranie nie je ovplyvnené zmenami podmienok medzi získavaním jednotlivých záznamov. Príkladom tejto metódy je Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), [47]:

- **viacobletová interferometria (repeat-pass interferometry)**

Používa digitálne obrazové záznamy z rôznych časových období. Táto metóda sa dá ešte podrobnejšie špecifikovať:

- **dvojobletová interferometria (two - pass interferometry)**

Pomocou dvoch snímok záujmového územia vytvoríme interferogram. Na základe interferogramu je možné vytvoriť výškový model terénu, za predpokladu, že sa nevyskytli deformácie. Pokiaľ je od tohto interferogramu odčítaný externý digitálny model povrchu, je možné získať deformačnú mapu územia.

- **trojobletová interferometria (three - pass interferometry)**

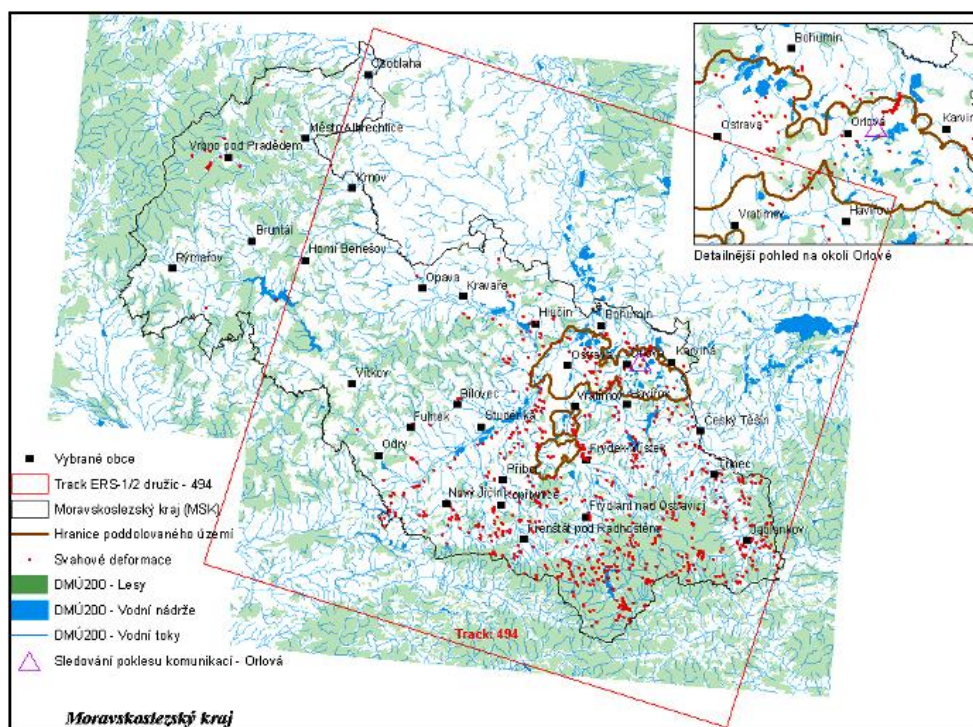
K dispozícii sú tri digitálne obrazové záznamy rovnakého územia, pričom jeden je považovaný za hlavný snímok a zostávajúce vedľajšie snímky sú k nemu pripojené. Ako uvádza [21], z 1. a 2. preletu sa vypočíta interferogram (volí sa krátka časová základňa a dlhá kolmá základňa, aby vynikla topografia), z 2. a 3. preletu sa tiež vypočíta interferogram (volí sa dlhá časová základňa a kolmá základňa čo možno najmenšia, aby sa prejavili polohové zmeny terénu) tak, aby obidva interferometrické páry mali spoločný hlavný snímok (2. prelet). Ich odčítaním sa vylúči vplyv topografie a z diferenčného interferogramu je potom možné posudzovať zmeny v teréne, ku ktorým došlo v dobe medzi získaním jednotlivých záznamov.

6. CHARAKTERISTIKA SKÚMANEJ OBLASTI

Kapitola sa zaoberá základnými charakteristikami oblasti vymedzenej pre spracovanie. Vymedzuje oblasť z hľadiska geografického rozloženia, hydrologických pomerov, zameriava sa na popis družicových obrazových záznamov určených pre spracovanie a približuje situáciu v oblasti v čase povodní.

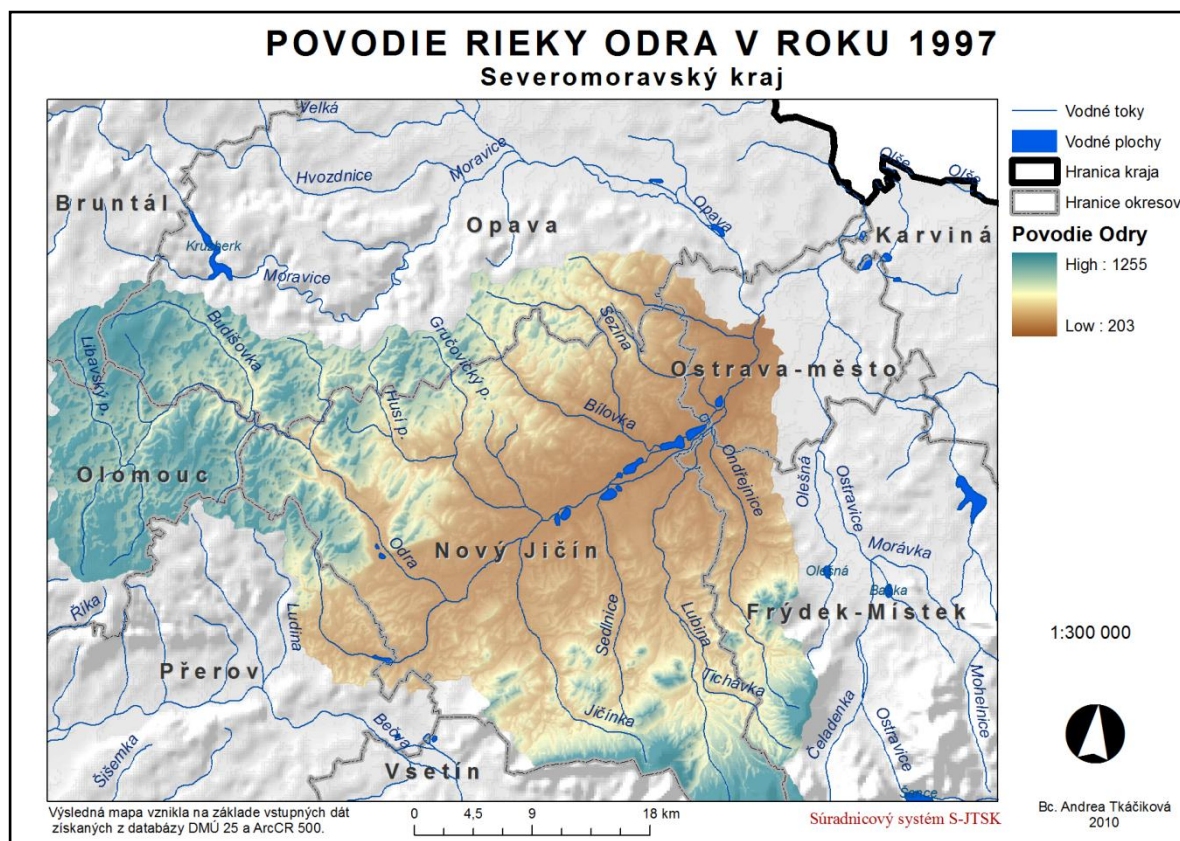
6.1 Vymedzenie skúmanej oblasti

Povodne, ktoré sa vyskytli na území Českej republiky v roku 1997 prebehli zhruba v rozpätí 5. - 16. júla 1997 na Morave, v Slezsku a na východe Čiech. Zápľavy zasiahli tiež susediace územie Poľska, Slovenska a Rakúska. Diplomová práca skúma dôsledky záplav na území Moravskoslezského kraja, v povodí rieky Odry. Záujmová oblasť je vymedzená z družicových záznamov. Ide o digitálne obrazové záznamy z družíc ERS-1 a ERS-2 (track 494, frame 2601), Presná definícia polohy radarového záznamu je daná číslom rady (*track*), v ktorej bol získaný a poradovým číslom snímku v tejto rade (*frame*). Jedna scéna z družice ERS pokrýva územie s rozlohou 100 km x 100 km, ktoré zachytávajú oblasť Moravskoslezského kraja, juhozápadnú časť Poľska a severozápadnú časť Slovenska. (*Obr. 10. Územie nasnímané družicami ERS-1 a ERS-2*). Predmetom diplomovej práce je spracovanie záznamov v povodí Odry na území Moravskoslezského kraja.



Obr. 10. Územie nasnímané družicami ERS-1 a ERS-2, prevzaté z [17]

Po stránke hydrologickej patrí oblasť povodia rieky Odry (*Obr. 11. Povodie Odry*) k úmoriu Baltského mora, vodu odvádza prostredníctvom troch ramien (Dziwna, Svina a Peene) a v Štetínskej delte severne od poľského Štetína sa vlieva do Baltského mora. Ako uvádza [33] je to 854 km dlhá rieka, pričom 112 km preteká v Českej republike. Hlavným tokom oblasti povodia Odry je rieka Odra s ďalšími významnými tokmi ako je Ostravica, Olša, Bělá a Moravica.

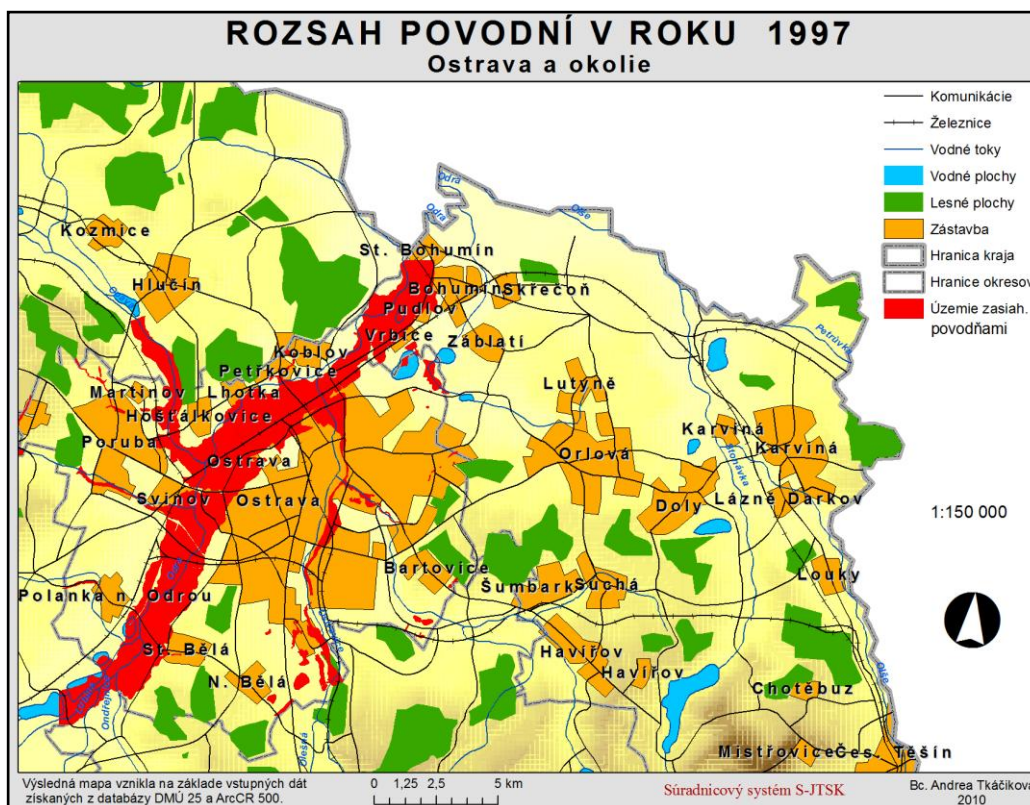


Obr. 11. Povodie Odry

6.2 Situácia v oblasti v čase povodne

Veľmi intenzívne zrážky na začiatku júla 1997 spôsobili na Morave veľmi rozsiahle záplavy. V piatok 4. júla 1997 sa vytvorila oblasť nízkeho tlaku vzduchu, ktorá postupovala smerom od severného Talianska okolo českých pohraničných hôr a v oblasti spoločnej hranice s Poľskom sa obrátila smerom na juh a postupovala do juhozápadného Poľska až do Slezska. Behom piatich dní sa celkový zrážkový úhrn na jednej tretine Moravy pohyboval okolo 500 mm. Priemerný ročný zrážkový úhrn vo veľkej časti Českej republiky činí 600 mm/rok. Táto zrážka spôsobila povodňové prietoky o veľkosti storočnej - päťstoročnej vody.

V priebehu dopoludnia 5.7. 1997 tlaková níz, ktorá vznikla nad Janovským zálivom postupovala k severovýchodu. V oblasti frontálneho rozhrania začalo silno pršať. Súvislé zrážkové pásmo sa postupne rozšírilo do väčšej časti Českej republiky. Do polnoci 6.7. 1997 postúpil stred prehlbujúcej sa tlakovej níše až nad Ukrajinu. Zrážky sa vyskytli nad južným Rakúskom, Moravou a Slezskom, Poľskom a na veternej strane severných Álp. V kritickom okamihu od 6. 7. sa zdvihli hladiny riek Ostravice, Olše, Bělé a ďalších tokov o 1,5 až 2 m. Celkové denné úhrny zrážok v júli 1997 v povodí rieky Odry sú zobrazené v prílohe č.1. Na horských tokoch kulminovali prietoky už 7.7. 1997, nižšie po tokoch 8.7. 1997 a v Bohumíne okolo 12. hodiny. Hladiny tokov v povodí Odry stúpili o 2 až 6 m. Odtoky Moravice prakticky zdržalo vodné dielo Slezská Harta. V Starých Hamrách na Ostravici začal vzostup prietokov 6.7. a kulminácia nastala 9.7. o 13.00. Vo VD Šance sa vlna výrazne stransformovala. Vo Sviadnove zaznamenali prvý vrchol 7.7. ráno o 6 hodine. Na sútokoch tokov a v nížinách nastali rozlivy, ktoré zaplavili obce a mestá vrátane Ostravy. Situácia je znázornená na Obr. 12. *Oblasť postihnutá povodňami na Morave.* Ostravica stúpala s niekoľkými vrcholmi vplyvom prítokov a v poslednej fáze odtokom z VD Šance. Prietoky Odry v Bohumíne ovplyvnila najskôr horná Odra a prítoky z Beskýd mimo povodia ovládaného nádržami vodných diel. Informácie som získala z portálov [33] a [40].



Obr. 12. Oblasť postihnutá povodňami, Ostrava a okolie

Povodne mali katastrofálne následky. Zasiahli 1/3 územia ČR a zavinili smrť 49 ľudí. Bolo postihnutých 536 obcí, 29 000 domov bolo zatopených alebo strhnutých. Spôsobili materiálne škody za viac ako 63 miliárd korún a na dlhú dobu ochromili život v postihnutých oblastiach, uvádza portál [42]. Povodňová vlna na Odre si pri prietoku Poľskom vyžiadala 55 ľudských životov a škody za 3,5 miliardy euro, [39] . Vážne postihnutým mestom bol Vratislav, kde povodňová vlna dosahovala 10 metrov.



*Obr. 13. Zaplavené územie obce Jeseník nad Odrou zo dňa 6.7.1997 o 12.30 hod.,
prevzaté z [42]*

6.3 Poveternostné podmienky

V piatok 4. 7. 1997 ležalo územie Moravy a Slezska na prednej strane výškovej brázdy nízkeho tlaku vzduchu, ktorá pomaly postupovala zo západnej do strednej Európy. V sobotu 5. 7. 1997 a v nedeľu prúdil nad našim územím vo vyšších hladinách atmosféry teplý a vlhký vzduch zo Stredomoria a pri zemi naopak chladnejší vzduch od severu, čím vzniknutá zrážková činnosť nadobúdala rýchlo na sile. Vzhľadom k značnej stagnácii celej situácie trval tento proces i po celú nedeľu 6. 7. 1997. Ešte v pondelok a v utorok zostávala situácia bez zmeny. Zrážky pokračovali a pršalo aj celý utorok a na Ostravsku a v Beskydách až do stredy rána. V stredu 9. 7. 1997 dopoludnia začala tlaková níz konečne ustupovať k východu, zrážky ustali a oblačnosť sa roztrhala. Prevzaté z portálu [48]. Aktuálny družicový snímok ČR zo dňa 11.7.1997 je zobrazený v prílohe č. 1. Snímok zobrazuje vzhľad oblačnosti nad strednou Európou a plošný rozsah záplav dňa 11.7. 03:55 CET z pohľadu meteorologických družíc NOAA 12 a 14. Je vidieť rozsah záplav na východe ČR a v Poľsku, rozvodnené rieky sú tu zobrazené takmer čiernou farbou.

7. VÝBER VHODNÝCH RADAROVÝCH DÁT

Cieľom tejto diplomovej práce je na základe známych princípov metódy diferenčnej radarovej interferometrie zistiť, či došlo k zmenám na povrchu terénu vplyvom povodňovej aktivity rieky Odry a jej prítokov v Moravskoslezskom kraji.

7.1 Výber radarových snímok

Základným predpokladom úspechu pri riešení každého projektu zameraného na využívanie metód radarovej interferometrie je správna voľba vhodných radarových snímok. Kritéria výberu závisia na tom, k čomu má daný výskum slúžiť. Hlavné rozhodnutia spočívajú vo výbere druhu použitého senzoru, zhodnotenia dostupnosti dát, výbere časovej a priestorovej základne a na charakteristikách terénu a atmosféry počas snímkovania.

Najvhodnejšie na interferometrické spracovanie sú plochy, ktoré sa v čase nemenia. U nich zostáva koherencia vysoká. Sú to zastavané plochy a územia bez vegetácie (okrem tých, od ktorých sa radarové žiarenie odráža). Neobývané územia a hospodárske plochy mimo vegetačného obdobia majú dostatočnú koherenciu až niekoľko mesiacov. Územie pokryté vegetáciou je vhodné len v prípadoch riedkej alebo nie príliš vysokej vegetácie a to tým, že neovplyvňuje výslednú fázu odrazeného žiarenia. Naopak hustá a vysoká vegetácia vykazuje nízku koherenciu i pri krátkych časových základniach a nie je preto vhodná pre tvorbu DMR interferometrickými metódami. Rovnako aj hladké asfaltové povrchy a vodné hladiny nie sú príliš vhodné, pretože sa väčšina signálu zrkadlovo odráža.

Ako bolo uvedené v kapitole 2.2 *Radar*, najvhodnejším zdrojom družicových dát pre radarovú interferometriu sú snímky z družíc ERS-1 a ERS-2. Práve snímky z týchto družíc boli vybrané pre spracovanie projektu. Generovanie úspešného interferogramu závisí na sezónnych a poveternostných podmienkach počas a pred získavaním informácií. Obvykle mokré počasie a hustý vegetačný kryt významne znižujú koherenciu. Výber dát musí tak byť vykonaný veľmi starostlivo, pričom sa detailne zvažujú meteorologické dáta.

Jednou z otázok, ktorá sa v tejto fáze naskytla bola voľba snímok z hľadiska doby získania. Bolo nutné zvážiť, či je výhodnejšie použiť nočné snímky oblasti alebo denné snímky skúmanej oblasti. Z hľadiska atmosférických vplyvov je vhodnejšie použiť snímky nočné. Problémom však je, že Česká republika nemá k dispozícii potrebný počet nočných snímok, ktoré by spĺňali potrebné kritéria na tvorbu ucelenej rady snímok. K požadovaným kritériám patrí napr. vhodný dátum získania snímok alebo vzdialenosť medzi družicami v dobe snímmania. Pre spracovanie boli použité denné snímky, získané v čase od 9.40 hod. do

9.50 hod. v termínoch, ktoré sú sprehľadnené v nasledujúcej tabuľke (*Tabuľka. č.1. Prehľad radarových záznamov použitých pri spracovaní*). Okrem dátumu a času snímania obsahuje tabuľka číslo orbity (obežná dráha družice), dĺžku kolmej základne a hodnotu Dopplerovho Centroidu.

Tabuľka. č. 1.: Prehľad radarových záznamov použitých pri spracovaní

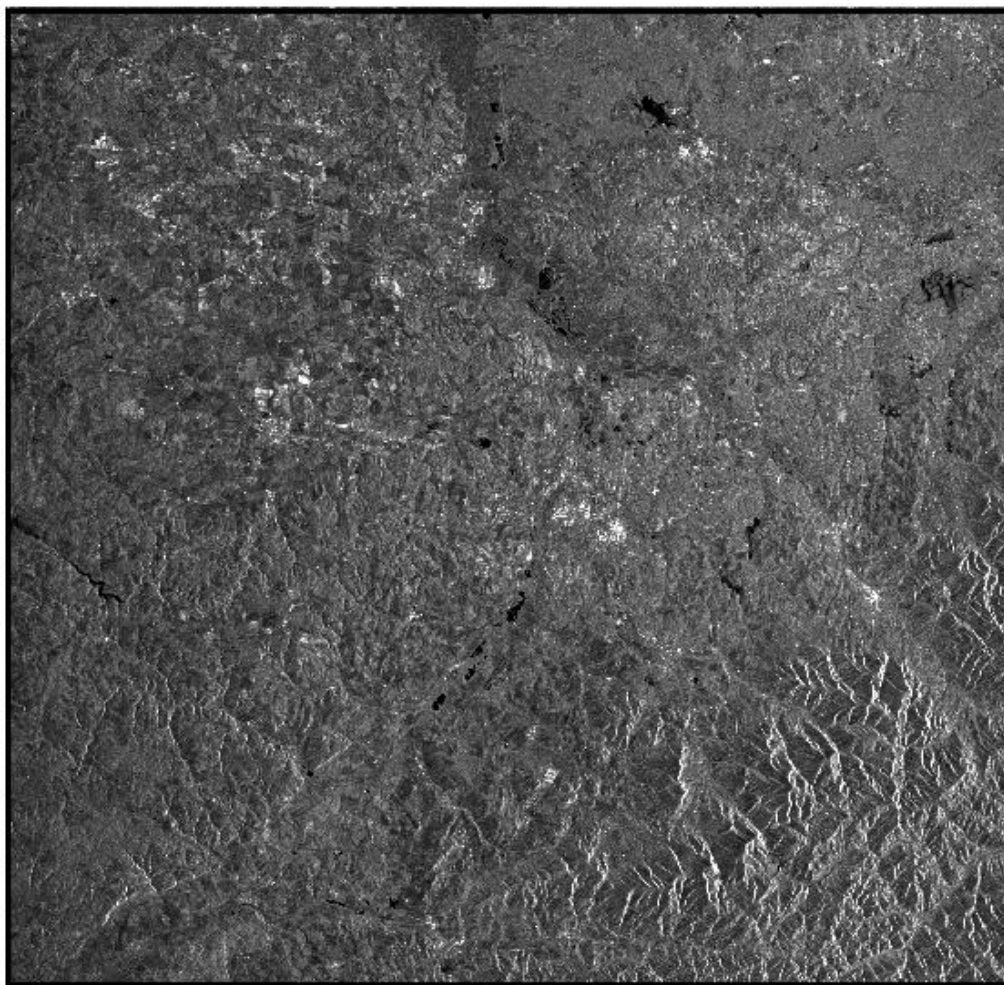
Družica	Dátum snímania	Čas snímania	Orbita	Kolmá základňa [m]	Dopplerov Centroid [Hz]
<i>E1</i>	<i>28.4.1996</i>	<i>9:40:53</i>	<i>25031</i>	<i>1245</i>	<i>477,743</i>
<i>E1</i>	<i>7.7.1996</i>	<i>9:42:56</i>	<i>26033</i>	<i>1113</i>	<i>486,913</i>
<i>E2</i>	<i>15.1.1996</i>	<i>9:40:56</i>	<i>3855</i>	<i>-102</i>	<i>2901,52</i>
<i>E2</i>	<i>19.2.1996</i>	<i>9:48:32</i>	<i>4356</i>	<i>1277</i>	<i>187,296</i>
<i>E2</i>	<i>29.4.1996</i>	<i>9:40:34</i>	<i>5358</i>	<i>1151</i>	<i>238,515</i>
<i>E2</i>	<i>16.9.1996</i>	<i>9:40:36</i>	<i>7362</i>	<i>521</i>	<i>200,247</i>
<i>E2</i>	<i>25.11.1996</i>	<i>9:45:40</i>	<i>8364</i>	<i>1589</i>	<i>199,513</i>
<i>E2</i>	<i>30.12.1996</i>	<i>9:47:44</i>	<i>8865</i>	<i>576</i>	<i>239,953</i>
<i>E1</i>	<i>14.1.1996</i>	<i>9:50:34</i>	<i>23528</i>	<i>0</i>	<i>3149,75</i>
<i>E1</i>	<i>18.2.1996</i>	<i>9:40:44</i>	<i>24029</i>	<i>412</i>	<i>385,326</i>
<i>E2</i>	<i>8.6.1998</i>	<i>9:40:44</i>	<i>16380</i>	<i>1035</i>	<i>265,161</i>
<i>E2</i>	<i>13.7.1998</i>	<i>9:49:50</i>	<i>16881</i>	<i>-261</i>	<i>238,102</i>
<i>E2</i>	<i>17.8.1998</i>	<i>9:40:55</i>	<i>17382</i>	<i>16</i>	<i>190,991</i>
<i>E2</i>	<i>21.9.1998</i>	<i>9:50:02</i>	<i>17883</i>	<i>164</i>	<i>349,454</i>
<i>E2</i>	<i>26.10.1998</i>	<i>9:40:08</i>	<i>18384</i>	<i>728</i>	<i>203,161</i>
<i>E2</i>	<i>30.11.1998</i>	<i>9:48:06</i>	<i>18885</i>	<i>576</i>	<i>159,614</i>
<i>E2</i>	<i>3.2.1997</i>	<i>9:40:00</i>	<i>9366</i>	<i>563</i>	<i>1865,27</i>
<i>E2</i>	<i>30.4.1997</i>	<i>9:40:44</i>	<i>10597</i>	<i>1245</i>	<i>219,802</i>
<i>E2</i>	<i>28.7.1997</i>	<i>9:40:37</i>	<i>11871</i>	<i>307</i>	<i>192,636</i>
<i>E2</i>	<i>1.9.1997</i>	<i>9:40:33</i>	<i>12372</i>	<i>660</i>	<i>239,983</i>
<i>E2</i>	<i>10.11.1997</i>	<i>9:47:44</i>	<i>13374</i>	<i>0</i>	<i>179,381</i>
<i>E2</i>	<i>15.12.1997</i>	<i>9:45:33</i>	<i>13875</i>	<i>-202</i>	<i>1927,1</i>
<i>E2</i>	<i>19.1.1998</i>	<i>9:40:49</i>	<i>14376</i>	<i>0</i>	<i>223,211</i>
<i>E2</i>	<i>23.2.1998</i>	<i>9:41:44</i>	<i>14877</i>	<i>18</i>	<i>167,456</i>
<i>E2</i>	<i>30.3.1998</i>	<i>9:40:56</i>	<i>15378</i>	<i>284</i>	<i>229,399</i>
<i>E2</i>	<i>4.5.1998</i>	<i>9:40:55</i>	<i>15879</i>	<i>754</i>	<i>235,04</i>

Ďalším základným predpokladom úspešnej aplikácie interferometrických metód je znalosť miery koherencie medzi dvoma radarovými snímkami, z ktorých sa zmeny povrchu terénu počítajú. Nevhodne zvolené snímky, medzi ktorými nie je dostatočná koherencia, sú pre tieto interferometrické metódy nepoužiteľné a preto je potrebné koherenčné pomery v záujmovej oblasti poznať ešte predtým, než sa príslušné radarové snímky získajú, uvádza [20]. Napríklad pár SAR snímok s časovou základňou dlhšou ako 70 dní je nesúvislý. Toto obmedzenie značne znižuje počet dostupných dát pre spracovanie.

„Koherencia je schopnosť zväzku elektromagnetického žiarenia (svetla) interferovať po prejdení určitej vzdialenosti“ (alebo uplynutí určitého času), uvádza [48]. Je podmienená zachovaním presnej frekvencie (monochromatickosti) a fázy na danom úseku. Napríklad, svetelný lúč z bežného „nekoherentného“ zdroja žiarenia je schopný pozorovateľnej interferencie napríklad v tenkej vrstve (medzi dvoma reflexnými rozhraniami), len ak je táto vrstva tenká niekoľko mikrometrov, pretože spontánne emitované fotóny v rôznych častiach lúča majú rozdielnu fázu a mierne odlišnú frekvenciu. Aby nastala pozorovateľná interferencia na väčšej vzdialenosti (napr. jednotky milimetrov), je potrebné použiť zdroj koherentného svetla.

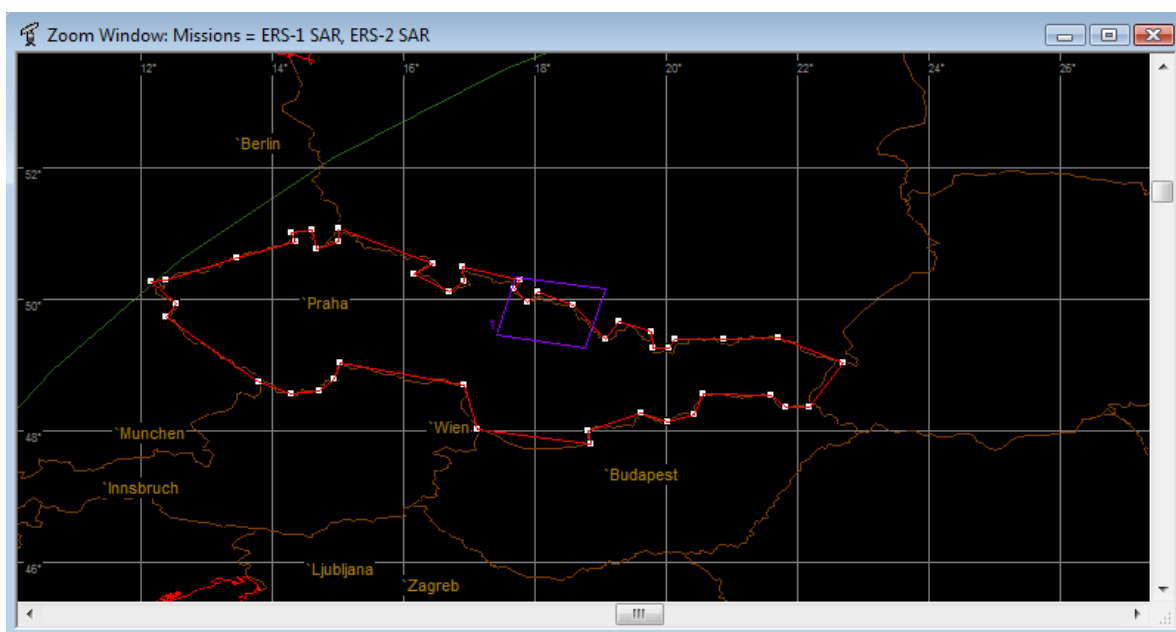
Koherencia medzi dvoma radarovými snímkami závisí na mnohých faktoroch, uvádza [22]. Medzi najdôležitejšie patrí časový odstup medzi termínmi získavania snímok a typ pokrytia zemského povrchu. V Strednej Európe v oblasti mierneho pásma je mnoho oblastí, ktoré sú permanentne neprístupné pre InSAR pozorovanie (napr. lesy) alebo sú dočasne neprístupné (orné pôdy). Len umelé štruktúry zostávajú súvislé v dlhšom časovom období.

Pred samotným spracovaním je nutné použité dáta skontrolovať a opraviť prípadné chyby. Originálne dáta (raw data) sú prepracované na SLC dáta (*Obr. 14. Dáta skúmanej oblasti vo formáte SLC (track 494)*), s ktorými dokáže pracovať Doris. SLC (Single Look Complex) je podľa [44] formát dát, ktorý zachováva informácie o fáze a amplitúde pôvodných SAR dát. SLC dáta sú uložené v šikmom smere, sú opravené o chyby spôsobené príjmom signálu z družice a obsahujú informácie o zemepisnej šírke a dĺžke. Formát SLC radarových dát je možné získať na objednávku aj priamo od agentúry ESA.



Obr. 14. Dáta skúmanej oblasti vo formáte SLC(track 494) zo dňa 19. 2. 1996

Vyhľadávanie SAR snímok z družíc ERS-1 a ERS-2 prebiehalo v software DESCW, ktorý k tomuto účelu vytvorila Európska vesmírna agentúra (ESA). Podrobnejší popis softwarového produktu je vysvetlený v kapitole 12.2 *DESCW Software*. Software existuje v dvoch variantoch, ktoré sa líšia spôsobom prístupu k aktuálnym informáciám. Tzv. „on-line“ verzia, ktorá je k dispozícii na internete, pristupuje k aktuálnym dátam priamo, „off-line“ verzia (Obr. 15. *Off-line verzia programu DESCW s vymedzením skúmanej oblasti*), ktorú je možné nainštalovať na osobný počítač, vyžaduje sťahovanie aktuálnych dát v podobe aktualizáčnych balíčkov. Spracovanie dát prebiehalo pre každý rok osobitne, pričom ich vyhodnotenie a interpretácia zmien bude uvedená v závere dokumentu.



Obr. 15. Off-line verzia programu DESCW s vymedzením skúmanej oblasti (track 494)

Najskôr je potrebné z dostupných snímok vybrať takú dvojicu, ktorá by najlepšie vyhovovala podmienkam kladeným na výpočet interferogramu, teda, aby mala čo najkratšiu časovú základňu a zároveň čo najväčšiu kolmú základňu. V nasledujúcich obrázkoch sú uvedené prehľady dostupných tandemových dvojíc:

Track n. : 494 - Frame n. : 2601

Mission	Date	Orbit	Parallel Baseline (m)	Perpendicular Baseline (m)	Delta Days	Doppler(KHz)
E1	19960114	23528	0	0	0	99.90
E1	19960218	24029	412	1170	35	99.90
E1	19960428	25031	510	1245	105	99.90
E1	19960707	26033	491	1113	175	99.90
E2	19960115	3855	-8	-102	1	99.90
E2	19960219	4356	463	1277	36	99.90
E2	19960429	5358	467	1151	106	99.90
E2	19960916	7362	210	521	246	99.90
E2	19961125	8364	565	1589	316	99.90
E2	19961230	8865	167	576	351	99.90

Double clicking to choose the "reference" orbit. All the baselines will be computed vs this one.
 WARNING: the baseline information is reliable ONLY if a couple is shown (not a single line)
 WARNING: a doppler value of 99.90 means no doppler info available, 12.70 means that the doppler could be over the threshold

OK Print Delete item Save

Obr. 16. Prehľad tandemových dvojíc radarových snímok z roku 1996

Ako je možné vidieť na Obr. 16. *Prehľad tandemových dvojíc radarových snímok z roku 1996*, najväčšiu kolmú základňu má tandemová dvojica snímok získaných 14. a 15. januára 1996. Tento termín je však nevyhovujúci vďaka prítomnosti snehovej pokrývky v teréne. Druhú najväčšiu kolmú základňu a zároveň najmenšiu časovú základňu má dvojica snímok získaných 28. a 29. apríla 1996. Z hľadiska snehovej pokrývky i vegetačného obdobia je tento termín už vyhovujúci. Keďže práca je zameraná na vyhodnotenie terénu po povodniach v lete 1997, bolo by najvhodnejšie použiť dáta práve z tohto letného obdobia. Pre toto časové obdobie však nie je získaný dostatočný počet obrazových záznamov, preto sa výber dát pre spracovanie sústredil na obdobie 19.2. 1996 pre master snímok a slave snímok bol získaný dňa 28.4.1996, čo je 69-dňový časový odstup a tým sa predpokladá dostatočná koherencia medzi snímkami.

Track n. : 494 - Frame n. : 2601

Mission	Date	Orbit	Parallel Baseline (m)	Perpendicular Baseline (m)	Delta Days	Doppler(KHz)
E2	19970203	9366	225	563	-280	99.90
E2	19970728	11871	218	307	-105	99.90
E2	19970901	12372	333	660	-70	99.90
E2	19971110	13374	0	0	0	99.90
E2	19971215	13875	-147	-202	35	99.90

Double clicking to choose the "reference" orbit. All the baselines will be computed vs this one.
 WARNING: the baseline information is reliable ONLY if a couple is shown (not a single line)
 WARNING: a doppler value of 99.90 means no doppler info available, 12.70 means that the doppler could be over the threshold

OK Print Delete item Save

Obr. 17. *Prehľad tandemových dvojíc radarových snímok z roku 1997*

Pre rok 1997 bol pre projekt poskytnutý len obmedzený počet snímok, čo výrazne zjednodušilo výber. Ako najvhodnejšia tandemová dvojica sa zdá byť dvojica snímok z 1.9.1997 a 10.11.1997, pretože ich časová základňa je v rámci výberu snímok najkratšia a kolmá základňa je dostatočne veľká. Avšak za účelom projektu by bolo najvhodnejšie použiť snímky zo dňa 28.7. a 1997 a zo dňa 1.9.1997, čo je práve obdobie po povodniach. Tu

však nastáva problém. Časové obdobie bezprostredne po povodniach nie je vyhovujúce z dôvodu ešte stálej zaplavenej plochy dôsledkom povodní. Ako oznámil portál [33], v tom čase sa voda zo zemského povrchu „vytratila“ až 15 – 30 dní po povodniach. Preto by interferogramy vytvorené z týchto snímok obsahovali oblasti s vysokou koherenciou, došlo by k odrazu EMG žiarenia od tejto vodnej plochy a interpretácia interferogramov by nebola v tomto prípade možná.

Track n. : 494 - Frame n. : 2601

Mission	Date	Orbit	Parallel Baseline (m)	Perpendicular Baseline (m)	Delta Days	Doppler(KHz)
E2	19980119	14376	0	0	0	99.90
E2	19980223	14877	75	18	35	99.90
E2	19980330	15378	152	284	70	99.90
E2	19980504	15879	344	754	105	99.90
E2	19980608	16380	453	1035	140	99.90
E2	19980713	16881	-34	-261	175	99.90
E2	19980817	17382	73	16	210	99.90
E2	19980921	17883	55	164	245	99.90
E2	19981026	18384	247	728	280	99.90

Double clicking to choose the "reference" orbit. All the baselines will be computed vs this one.
 WARNING: the baseline information is reliable ONLY if a couple is shown (not a single line)
 WARNING: a doppler value of 99.90 means no doppler info available, 12.70 means that the doppler could be over the threshold

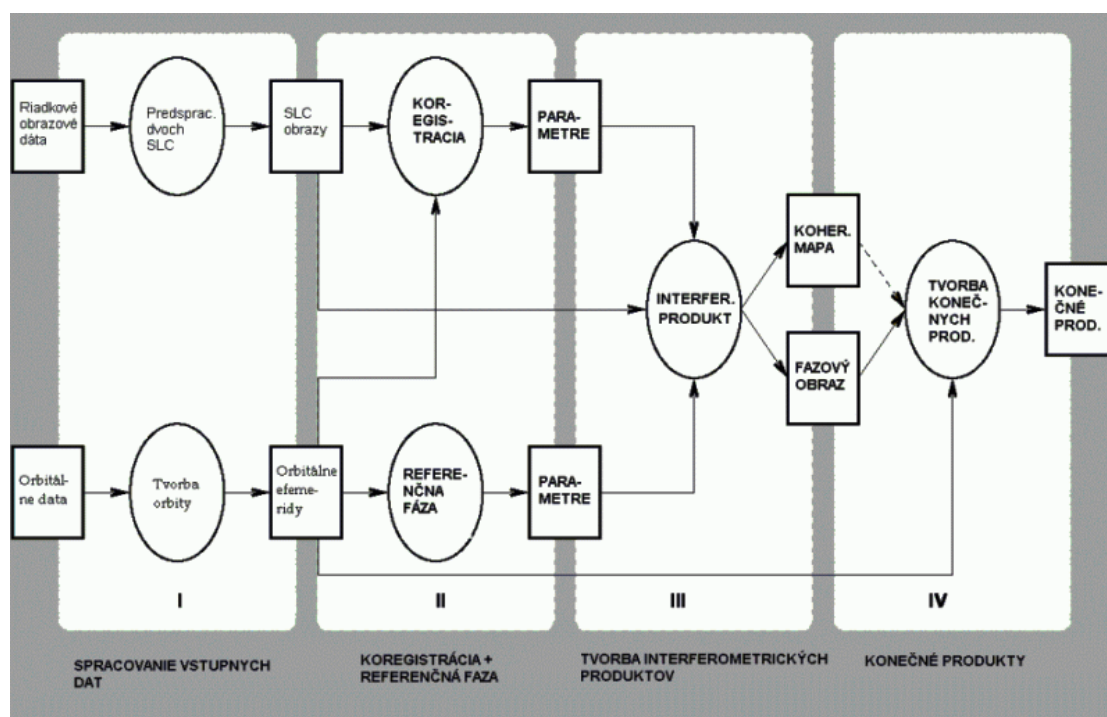
OK Print Delete item Save

Obr. 18. Prehľad tandemových dvojíc radarových snímok z roku 1998

V roku 1998 bol pre každý mesiac (od januára do októbra) nasnímaný jeden snímok. A práve preto je potrebné zistiť presný časový okamih medzi získaním jednotlivých snímok. Najkratšia časová základňa je medzi dvojicou snímok získaných 23.2.1998 a 30.3.1998 a tiež medzi dvojicou z dní 13.7.1998 a 17.8.1998. Práve táto dvojica je najvhodnejšia pre tvorbu interferogramu, pretože snímky boli nasnímané počas vhodných atmosférických podmienok.

7.2 Spracovanie radarových záznamov

Na samotné spracovanie dát bol použitý open-source nástroj Doris (podrobnejší popis v kap. 12.1 *Doris Software*), podľa [28]. Spracovanie dát prebiehalo v štyroch základných blokoch. Prvý blok predstavuje spracovanie surových radarových dát a dát o obežných dráhach do rôznych formátov. V tomto bloku hral hlavnú úlohu programový balík *getorb*, ktorý spracováva presné dáta o orbitách družíc ERS-1 a ERS-2. Druhý blok pozostával z koregistrácie hlavných snímok na vedľajšie snímky a z výpočtu referenčnej fázy elipsoidov. V tretej fáze sú vypočítané konkrétne interferometrické produkty ako mapa koherencie a jednotlivé snímky referenčných fáz. V záverečnom štvrtom bloku sa vypočítavajú konečné produkty ako napr. deformačná mapa alebo DMR. Uvedený postup je znázornený na nižšie uvedenom obrázku (*Obr. 19. Postup spracovania radarových snímok*).



Obr. 19. Postup spracovania radarových snímok, prevzaté a upravené podľa [17]

Samotný program Doris [28] pokrýva len kroky II. a III. Jednotlivé kroky procesu spracovania implementované v Dorise sú vysvetlené v tabuľke. (*Tabuľka č. 2. Súhrn procesov implementovaných v programe Doris.*) Krok IV. Je možné spracovať v akomkoľvek produkte, ktorý dokáže pracovať s radarovými dátami. Pre túto diplomovú prácu bol využitý software NEST DAT 3C a programový balík ArcInfo 9.2.

Tabuľka č. 2.: Súhrn procesov implementovaných v programe Doris

ID	Proces	Popis procesu
1.	M_READFILES S_READFILES	Načítava parametre procesu zo súboru vo formáte SLC (null/leader/volume a data) pre master slave snímku
2.	M_PORBITS S_PORBITS	Získava presné dáta o obežných dráhach.
3.	M_CROP S_CROP	Zápis dát vo formáte SLC na disk vo formáte raw (pixel preložený 2b/2b short integer)
4.	M_FILTAZI S_FILTAZI	Spektrálna filtrácia hlavného snímku v smere azimutu. Spektrálna filtrácia vedľajšieho snímku v smere azimutu.
5.	COARSEORB	Vypočíta preklad (prepočet) medzi hlavnou a vedľajšou snímkou pomocou orbít (s presnosťou na 30 pixlov)
6.	COARSECORR	Vypočíta preklad (prepočet) medzi hlavnou a vedľajšou snímkou na úrovni pixlu pomocou korelačnej techniky.
7.	FINE	Vypočíta preklad vektorov cez hlavný snímok na úrovni subpixelov.
8.	COREGPM	Vypočíta aktuálny transformačný model pre zarovnanie vedľajšieho snímku na hlavný snímok.
9.	RESAMPLE	Prevzorkuje hlavný snímok podľa transformačného modelu koreregistrácie.
10.	FILTRANGE	Spektrálna filtrácia hlavného snímku a vedľajšieho snímku v smere pixlu.
11.	INTERFERO	Tvorba komplexného interferogramu.
12.	COMPREFPHA	Vypočíta referenčnú fázu elipsoidu odčítanú z interferogramu (polynomická transformácia).
13.	SUBTRREFPHA A	Odčíta referenčnú fázu elipsoidu z interferogramu.
14.	COMPRREFDE M	Vypočíta referenčnú fázu DMR odčítanú z interferogramu.
15.	SUBTRREFDE M	Odčíta referenčnú fázu z DMR pre interferogram.
16.	COHERENCE	Vypočíta komplexnú koherenčnú mapu.
17.	FILTPHASE	Filtrácia interferogramu.
18.	UNWRAP	Rozbalenie interferogramu.
19.	SLANTH2H	Vypočíta počet pixlov v radarom kódovanom systéme.
20.	DINSAR	Viacobletová radarová interferometria.
21.	GEOCODE	Geokódovanie pixlov (konverzia pixlov zo súradnicového systému radaru do referenčného systému Zeme).

8. TVORBA INTERFEROMETRICKÝCH PRODUKTOV

Ako vyplýva zo zadania cieľov diplomovej práce, nasledujúca fáza spracovania sa venuje tvorbe interferogramov a to najskôr pomocou metódy two-pass D-InSAR (dvojbletová interferometria) a potom pomocou metódy three-pass D-InSAR (trojbletová interferometria) v programe Doris. Kapitola popisuje spracovanie radarových dát a tvorbu interferogramov pre rok 1998. Topo pár predstavuje dvojica snímok zo dňa 4. mája 1998 ako master a 8. júna 1998 ako slave snímok. Defo pár je dvojica snímok zo dňa 4. mája a 13. júla 1998. Celý postup spracovania je však rovnaký pre všetky spracovávané páry snímkov.

8.1 Základné charakteristiky spracovania

Už som spomenula, že samotné spracovanie snímok prebiehalo v programe Doris Software. Program spracováva údaje o radarových snímkach v podobe konfiguračných (vstupných a výstupných) súborov.

8.1.1 Vstupné súbory (input files)

Každý vstupný súbor obsahuje názvy procesov a jeden alebo viac parametrov, ktoré tieto procesy kontrolujú (viď. Obr. 20. *Vstupný konfiguračný súbor pre software Doris*). Procesy sú identické pre oba snímky s tým rozdielom, že pre master snímky je pred názvom snímku M a pre slave snímky zasa S (napr. M_READFILES a S_READFILES). Parametre sú oddelené medzerou alebo tabulátorom. Vstupný súbor pozostáva z hlavičky a obsahu. Hlavička obsahuje názvy všeobecných procesov, zatiaľ čo v obsahu súboru sú umiestnené procesy špecifické pre konkrétne súbory. Poradie procesov nie je obmedzené, ale súbor nesmie obsahovať prázdne riadky, tie musia byť okomentované. Kompletný vstupný súbor pre master snímok zo dňa 4. mája 1998 je zobrazený v prílohe č.3.

```

read.in

SCREEN info      //debug|info|progress|warning|error
c
BEEP ON          //off|warning|error|progress|on
c
BATCH ON         //on|off
PREVIEW ON       //
c
c OVERWRITE ON   //on|off
LISTINPUT ON     //on|off
c MEMORY 20      //in MB
c
c *****file settings*****
c
LOGFILE doris.log
M_RESFILE ./jan15.out
S_RESFILE ./feb19.out
I_RESFILE ./i_jan15_feb19.out
c
c *****Processing*****
c ****read files*****
c
PROCESS m_readfiles //
M_IN_METHOD ERS
M_IN_VOL ./jan15/VDF_DAT.001 // slc volume file
M_IN_LEA ./jan15/LEA_01.001 // slc leaderfile
M_IN_DAT ./jan15/DAT_01.001 // slc data file
M_IN_NULL ./jan15/NUL_DAT.001 //
c
PROCESS s_readfiles //
S_IN_METHOD ERS // default
S_IN_VOL ./feb19/VDF_DAT.001 // slc volume file
S_IN_LEA ./feb19/LEA_01.001 // slc leaderfile
S_IN_DAT ./feb19/DAT_01.001 // slc data file
S_IN_NULL ./feb19/NUL_DAT.001 //
c
STOP

```

Obr. 20. Vstupný konfiguračný súbor pre software Doris

8.1.2 Výstupné súbory (output files)

Program Doris generuje tri výstupné súbory, [37]. Ide o výstupný súbor z výsledkami spracovania konkrétnych krokov pre hlavný (master) a vedľajší (slave) snímok a výstupný súbor pre výsledky konečného produktu (interferogramu). Časť výstupného súboru pre interferogram je znázornený na Obr. 21. Výstupný konfiguračný súbor pre software Doris. V každom výstupnom súbore sa ukladajú aj všetky ďalšie výsledky nasledujúceho kroku spracovania. Opäť aj výstupný súbor pozostáva z hlavičky a obsahu. Hlavička obsahuje všeobecné informácie a prehľad o spracovaní jednotlivých krokov. Každý krok spracovania môže prebehnúť len raz, čím sa zabráni prepísaniu správnych výsledkov posledného kroku. Napríklad výstupný súbor master snímku obsahuje vlnovú dĺžku, meno súboru pre master snímok, zatiaľ čo parametre koregistrácie, špecifické pre konkrétny snímok, nájdeme vo výstupnom súbore produktu spracovania.

```

i_jan15_feb19.out      Názov výstupného súboru

Start_process_control
coarse_orbits:         1
coarse_correl:         1
fine_coreg:           1
timing_error:          0
dem_assist:            0
comp_coregpm:         1
interfero:             1
coherence:             1
comp_refphase:         1
subtr_refphase:        1
comp_refdem:           1
subtr_refdem:          0
filtphase:            1
unwrap:               1
slant2h:               0
geocoding:             0
dinsar:               0
NOT_USED2:            0
End_process_control

Kontrola procesov:
1 - už spracované procesy
0 - nespracované procesy

Údaje o radarovom obraze

*****
* Start_coarse_orbits:
*****
Some info for pixel: 8879, 1698 (not used):
Btemp [days]:      35      // Temporal baseline
Bperp [m]:         1385    // Perpendicular baseline
Bpar [m]:          450.2   // Parallel baseline
Bh [m]:            1455.8  // Horizontal baseline
Bv [m]:            39.7   // Vertical baseline
B [m]:             1456.3  // Baseline (distance between sensors)
alpha [deg]:       1.6    // Baseline orientation
theta [deg]:       19.6   // look angle
inc_angle [deg]:   22.1   // incidence angle
orbitconv [deg]:   0.00515686 // angle between orbits
Height_amb [m]:    -6.4   // height = h_amb*phase/2pi (approximately)
Control point master (line,pixel,hei) = (8879, 1698, 0)
Control point slave (line,pixel,hei) = (12107.5, 1725.46, 0)
Estimated translation slave w.r.t. master (slave-master):
Positive offsetL: slave image is to the bottom
Positive offsetP: slave image is to the right
Coarse_orbits_translation_lines: 3229
Coarse_orbits_translation_pixels: 27
*****
* End_coarse_orbits: _NORMAL
*****

```

Obr. 21. Výstupný konfiguračný súbor pre software Doris

8.2 READFILES

Proces načíta základné parametre dátového súboru (snímku). Tieto parametre sa používajú v ďalšom procese. Povinným parametrom procesu je M_IN_METHOD. Metóda určuje snímač, ktorým boli snímky získané. Oba snímky (master aj slave) musia byť nasnímané rovnakým snímačom.

8.3 PORBITS

Ďalším krokom spracovania je fáza načítania dát o orbitách jednotlivých družíc. Ide o obežné dráhy družíc ERS-1 a ERS-2, [29]. Informácie sú uložené vo forme binárneho súboru *ODR.**. Podľa [50] obsahuje súbor parametre obežnej dráhy ako sú vzdialenosť pericentra a apocentra, excentricita, sklon dráhy, dĺžka vzostupného uhla alebo doba obehu. O túto fázu spracovania sa stará modul *getorb*, ktorý je štandardne súčasťou Doris Software.

Tento balík obsahuje niekoľko utilít pre manipuláciu so súbormi obežných dráh. Program umožňuje interpolovať informácie o obežnej dráhe a konvertovať ich na dátum. Efemeridy sú zapísané do pomocného súboru s názvom "scratchorbit" (vid'. Obr. 22. Informácie o orbitách radarových záznamov) a neskôr umiestnené do výstupného súboru. Pre interpoláciu sú použité „natural cubic splines“ krivky, takže je lepšie definovať kratší časový interval.

```
*****
*_Start_precise_orbits:
*****
      t(s)      X(m)      Y(m)      Z(m)
NUMBER_OF_DATAPOINTS:              7
34852.000000      4268718.957      1771604.879      5464736.117
34856.000000      4292340.349      1772504.727      5445954.678
34860.000000      4315888.133      1773360.207      5427078.488
34864.000000      4339361.873      1774171.347      5408107.875
34868.000000      4362761.140      1774938.176      5389043.168
34872.000000      4386085.501      1775660.724      5369884.697
34876.000000      4409334.528      1776339.022      5350632.796
*****
*_End_precise_orbits:_NORMAL
*****
```

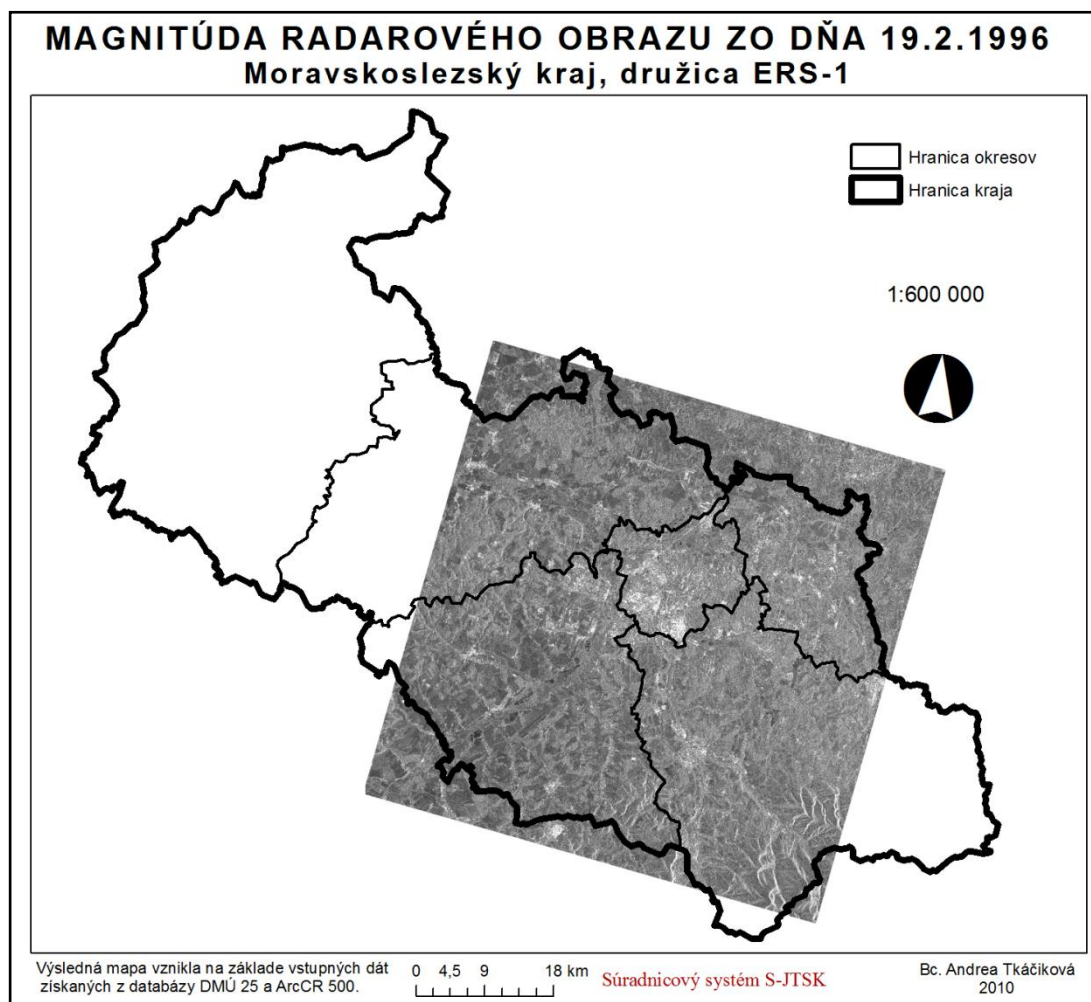
Obr. 22. Informácie o orbitách radarových záznamov

Na obrázku sú znázornené informácie o orbitách radarového záznamu zo dňa 4.mája 1998 družice ERS-2. Ide o efemeridy (x, y, z) a časový okamih udávaný v sekundách za deň, konkrétne pre 7 bodov.

8.4 CROP

Oblasť, ktorú zaznamenávajú radarové snímky je pomerne rozsiahla. Pre lepšiu interpretáciu radarových snímok som previedla výrez menšej oblasti z pôvodného snímku. Dôvodom pre tento krok je, že normálne pracujem s dátami vo formáte SLC, ktoré sú uložené niekde vo vzdialenom priečinku a ja tieto dáta potrebujem uložiť do zložky, v ktorej pracujem tak, aby sa mohli vykonávať operácie, požadujúce oba snímky (master aj slave). Tieto snímky slúžia ako vstup pre rôzne ďalšie operácie. Modulom pre spracovanie je M_CROP a S_CROP. Krok vykonáva niekoľko kontrol, pokiaľ ide o počet riadkov, ktorý je napísaný v hlavičke súboru dát formátu SLC ako aj v hlavnom súbore. Obraz sa načítava a zapisuje riadok po riadku, neprebíha tu žiadna konverzia dát, pričom sa počíta od prvého pixlu na prvom riadku. Výrez je definovaný na základe zemepisnej šírky a dĺžky centrálného pixelu a jeho výšky a šírky v pixloch. Výstupom sú v tomto prípade rastre, ktoré predstavujú

vybranú (orezanú) oblasť. Pri interferometrickom spracovaní som sa zamerala na výrez oblasti, ktorej stred scény je definovaný zemepisnými súradnicami $49,8083^{\circ}$ severnej šírky a $18,2050^{\circ}$ východnej dĺžky, pričom som zadefinovala výšku 15 000 riadkov a šírku 3 000 pixelov (cca 60×60 km), čo znázorňuje Obr. 23. Výrez dát záujmového územia zo dňa 19.2.1996.

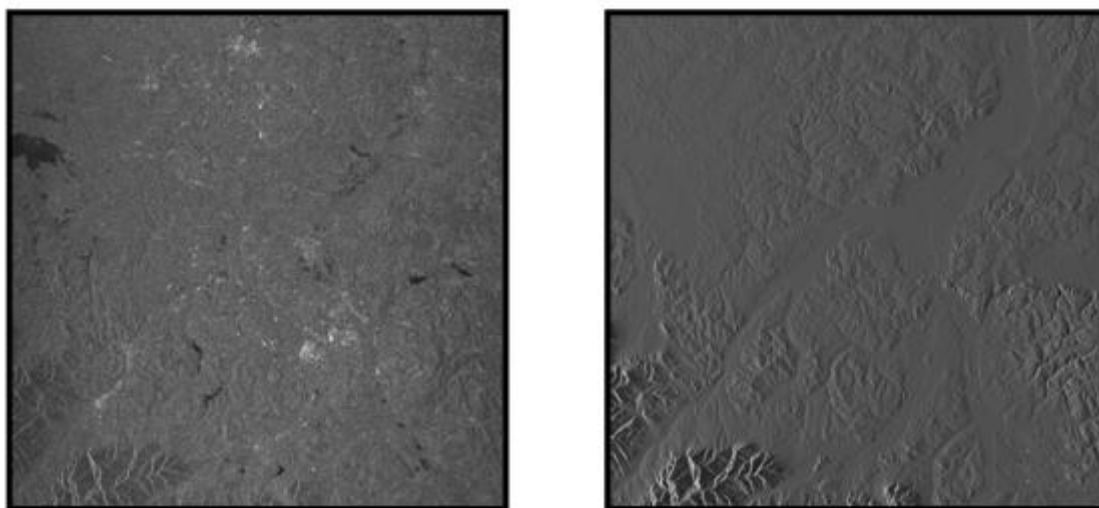


Obr. 23. Výrez dát záujmového územia zo dňa 19.2.1996, ERS-1

8.5 M_SIMAMP

Nasledujúci krok simuluje amplitúdu master snímku. Tento krok vyžaduje externý digitálny model terénu (DEM), ako napr. SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, [47]) a údaje o nadmorskej výške. V nasledujúcom kroku M_TIMING, je použitá amplitúda na výpočet absolútnej chyby načasovania master snímku. Amplitúda sa vypočítava pomocou orbitálnych a topografických údajov. DEM by mal byť v systéme WGS84 (rovnaký ako systém obežnej dráhy). Porovnanie skutočnej amplitúdy snímku a amplitúdy simulovanej

podľa digitálneho modelu terénu naznačujú Obr. 24. Výrez pôvodnej radarovej snímky a Obr. 25. Simulovaná amplitúda výrezu snímky.



Obr. 24. Výrez pôvodnej radarovej snímky Obr. 25. Simulovaná amplitúda výrezu snímky

Na snímkoch môžeme vidieť amplitúdu, ktorá udáva intenzitu odrazeného žiarenia, pričom na pôvodnom snímku sú jej priradené konkrétne farby. Najväčšej hodnote amplitúdy odpovedá biela farba, najnižšej hodnote čierna farba. Simulovaná amplitúda sa zobrazuje ako tieňovaný reliéf.

8.6 M_TIMING

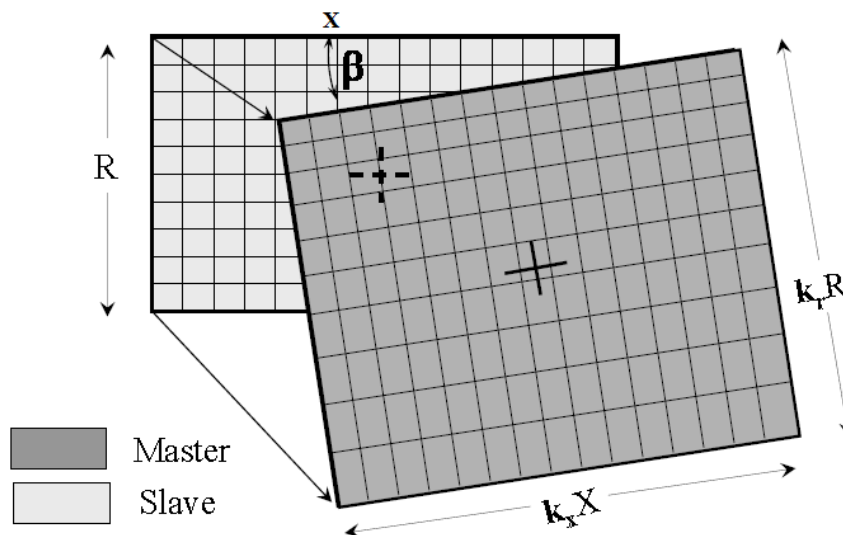
Proces určí absolútnu chybu medzi DEM a master snímkou pomocou simulovanej amplitúdy a výsledku hrubej koregistrácie. Preto sa tento krok prevádza po krokoch M_CROP a M_SIMAMP. Chyba sa odhaduje v smere azimutu ako aj v smere rozsahu. Podľa [25] počas koregistrácie, kedy je hlavný snímok usporiadaný podľa DEM-u na základe simulovanej amplitúdy, je vytvorený jediný posun pre celý obrázok. Vzhľadom k tomu, že rozlíšenie DEMu je typicky väčšie (napr. SRTM3: 90 m) ako je radarový snímok a rozlíšenie radaru sa líši v smere azimutu a v smere rozsahu, citlivosť v koregistrácii sa medzi týmito dvoma smermi (merané v rozlíšení bunky) líši, napr. pre ERS-1 a ERS-2 aplikujeme okno korelácie 256 riadkov a 128 pixlov. Zo základných parametrov, ktoré tento proces ponúka je potrebné určiť metódu výpočtu. Ďalej udávame počet okien, v ktorých má byť rozložený celkový obraz pre odhad posunu. Mal by byť väčší ako 5, čím sa zabezpečí konzistentnejší odhad. Udávame aj veľkosť okna v riadkoch a pixloch. Štandardne je predvolená hodnota 256 a 128 a táto hodnota je v prípade potreby prevedená na nepárne čísla.

8.7 OVS

Oversampling, čiže prevzorkovanie je snímanie a zaznamenávanie hodnôt amplitúdy signálu v konkrétnych časových okamihoch. Proces vzorkovania má na starosti modul M_OVS a S_OVS a prevádza sa na orezané dáta (po procese CROP). Ako vstupné parametre sa zadáva meno výstupného súboru, formát výstupu, faktor prevzorkovania výstupného obrazu v smere rozsahu (počet pixlov), faktor prevzorkovania výstupného obrazu v smere azimutu (počet riadkov) a veľkosť kernelu (jadra) pre prevzorkovanie (čo je vlastne dĺžka interpolačnej základne).

8.8 Koregistrácia zdrojových radarových snímok

Prvý krok pri spracovaní páru radarových snímok, tzv. koregistrácia. Krok je veľmi citlivý na presnosť prevedenia. Podľa [8] koregistrácia znamená preloženie jedného snímku na druhý, a prevzorkovanie priloženého snímku tak, aby poloha jeho pixlov presne odpovedala polohe pixlov druhého snímku, s presnosťou okolo 0.1 pixlu, zobrazené na Obr. 26. *Koregistrácia radarových snímok*. Potom sa odčítajú fázy na oboch snímkoch, čím získame interferogram.



Obr. 26. Koregistrácia radarových snímok, prevzaté z [24]

Hodnoty pixlov v tomto interferograme predstavujú rozdiel fáz v intervale $(-\pi; \pi)$, uvádza [23]. Koregistrácia master a slave snímku zo sub-pixlovou presnosťou je pre ďalšie interferometrické spracovanie nevyhnutná. Vzhľadom k začiatočnému a koncovému času snímkovania daného úseku môže dôjsť k pozdĺžnemu posunu až niekoľko tisíc riadkov. V priečnom smere je posun závislý na veľkosti kolmej základne a môže ísť rádovo o desiatky

pixlov. Koregistrácia vlastne znamená natransformovanie oboch snímok do spoločného systému. Ide o pretransformovanie a prevzorkovanie slave snímku do systému master snímku. Z dôvodu výpočtovej náročnosti tento proces prebieha v dvoch krokoch – hrubá a jemná koregistrácia. Prevzaté z [13].

- *Hrubá koregistrácia* – pre výpočet v Dorise na to slúžia moduly COARSEORB, ktorý spočíta „offset“ (posun) snímok na základe známych presných dráh družíc. Následne modul COARSECORR spočíta presnejší „offset“ pomocou hodnôt amplitúd v obrazoch.
- *Jemná koregistrácia* – pri známych hodnotách z hrubej koregistrácie môže dôjsť k jemnej koregistrácii. Pri tomto kroku sa spočíta vzájomný „ofset“ v mnohých oknách oboch snímok s presnosťou až 0,1 pixlu. K tomuto kroku slúži modul FINE.

8.8.1 COARSEORB

Všetky spracovávané hlavné a vedľajšie radarové obrazy boli získané dvoma rôznymi SAR radarmi - z odlišných miest a v rôznych časových okamihoch. Vplyvom týchto faktorov môže nastať posun pozdĺžny s dráhou nosiča SAR (v rádoch tisícov riadkov) a posun priečny na dráhu nosiča SAR (v ráde desiatok pixlov). Ako uvádza [13] a [15] krok COARSEORB počíta koregistráciu radarových obrazov založenú na znalosti orbít vedľajšieho a hlavného radarového obrazu s presnosťou okolo 30 obrazových bodov. Je najrýchlejším spôsobom získania hrubého posunu. Na výpočet geometrického posunu je použitý virtuálny bod v strede snímky. Po spustení procesu sa vygeneruje spomínaný výstupný súbor s informáciami o interferograme (viď *Obr. 27. Výsledky koregistrácie radarového záznamu, 19.2.1996, ERS-2*). Prvá časť tohto súboru obsahuje užitočné informácie o vypočítaných parametroch virtuálneho kontrolného bodu. Výsledne hodnoty hrubej koregistrácie sú základom výpočtu kroku COARSECORR.

```
*****
* Start_coarse_orbits:
*****
Some info for pixel: 17502, 2270 (not used):
Btemp      [days]:      35      // Temporal baseline
Bperp      [m]:         474      // Perpendicular baseline
Bpar       [m]:        191.5     // Parallel baseline
Bh         [m]:         511      // Horizontal baseline
Bv         [m]:        -14.9     // Vertical baseline
B          [m]:        511.3     // Baseline (distance between sensors)
alpha      [deg]:       -1.6     // Baseline orientation
theta      [deg]:       20.3     // look angle
inc_angle  [deg]:       23       // incidence angle
orbitconv  [deg]:    0.000588661 // angle between orbits
Height_amb [m]:        -19.7     // height = h_amb*phase/2pi (approximately)
Control point master (line,pixel,hei) = (17502, 2270, 0)
Control point slave (line,pixel,hei) = (17457.1, 2245.77, 0)
Estimated translation slave w.r.t. master (slave-master):
Positive offsetL: slave image is to the bottom
Positive offsetP: slave image is to the right
Coarse_orbits_translation_lines: -45
Coarse_orbits_translation_pixels: -24
*****
* End_coarse_orbits:_NORMAL
*****
```

Obr. 27. Výsledky koregistrácie radarového záznamu, 19.2.1996, ERS-2

Geometricky vypočítaný offset medzi master a slave snímkou je posunutý o -45 riadkov (180 m) a -24 pixelov v smere rozsahu (480 m). Kolmá základňa je 474 m a výšková nejednoznačnosť udáva, že výškový rozdiel -19,7 m indikuje jeden prúžok (jedna fáza cyklu, 2π).

8.8.2 COARSECORR

Spočíta presný posun v smere azimutu (riadok) a posun v smere range (pixel) medzi hlavným a vedľajším radarovým obrazom, a to s presnosťou niekoľko obrazových bodov. Výsledkom je jeden posun pre celú scénu. Využíva znalosť magnitúdy obrazov a približnú znalosť hodnoty tohto posunu. Pre tento výpočet sú potrebné parametre z predchádzajúceho kroku a výsledok je s presnosťou na niekoľko málo pixlov. Medzi hrubou a jemnou koregistráciou sa obidva obrazy ešte filtrujú v smere azimutu, na čo slúžia moduly M_FILTAZI a S_FILTAZI.

8.8.3 M_FILTAZI

Krok M_FILTAZI prevedie filtráciu hlavného radarového obrazu v smere azimutu. Tento krok sa musí prevádzať medzi hrubou a jemnou koregistráciou. Dôvodom je použitie posunu získaného z hrubej koregistrácie. V priebehu filtrovania sú neprekrývajúce sa časti obrazu odrezané. Proces znižuje šum interferometrickej fázy, ak majú master a slave snímok rozdielne frekvencie Dopplerového centroidu (snímanie pod iným uhlom). V tomto prípade je frekvencia Dopplerového centroidu 235.0402069 Hz pre master a 265.1614075 Hz pre slave snímok. Vzhľadom k tomu, že celková šírka pásma pre azimut je 1378 Hz, neprekrývajúca sa

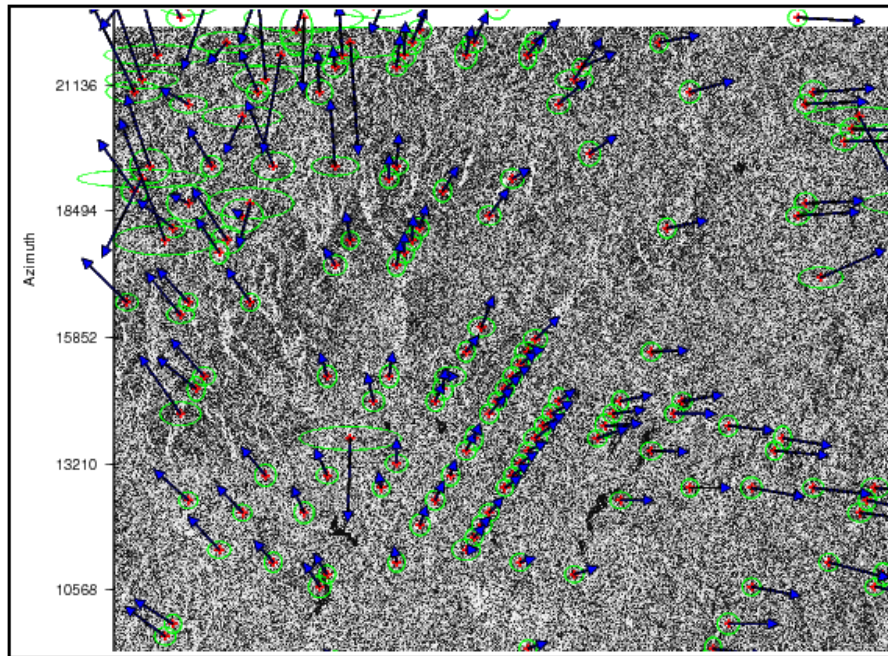
časť spektra je približne 20% z celkovej šírky pásma. Preto je potrebná filtrácia v smere azimutu.

8.8.4 S_FILTER

Krok S_FILTER je rovnaký ako krok M_FILTER, s tým rozdielom, že prevedie filtráciu vedľajšieho radarového obrazu, a to opäť v smere azimutu. Normálne sa oba procesy vykonávajú súčasne. Avšak, tieto dva oddelené procesy filtrujú len slave snímok (všetky slave snímky sa koregistrujú na ten istý master snímok). Má to tú výhodu, že pre každý interferogram sa vytvorí len malý súbor pre master snímok. Nevýhodou filtrovania master snímku samozrejme je, že malá časť master spektra nie je zdieľaná so spektrom slave snímku, čím sa stráca koherencia v interferograme.

8.8.5 FINE

Krok FINE obsahuje jemnú koregistráciu radarových obrazov a vychádza z hodnôt posunu (riadok, pixel) vypočítaného v kroku COARSECORR. Spresnenie posunu je založené na výpočte korelácie mnohých malých polí radarového obrazu. Opäť je tu využitá známa magnitúda radarových obrazov. Posun vektorov pre zarovnanie slave snímku na master snímok sa vypočítava so sub-pixlovou presnosťou na základe počtu lokalizácií v master snímku (viď. Obr. 28. *Vizualizácia reziduí medzi modelom a pozorovaniami pri jemnej koregistrácii*). Pre celý obraz, pre veľký počet okien, je posun medzi master a slave snímkou odhadnutý výpočtom korelácie z magnitúdy na úrovni pixlov. Veľmi dôležitým parametrom je faktor prevzorkovania, ktorý je v tomto prípade nastavený na 32, závisí od neho presnosť odhadu vektorov offsetu medzi master a slave snímkou. Pre krátku časovú základňu sa musí použiť veľký počet okien a to z praktického hľadiska. Často je vhodné použiť až 3000 - 40000 okien a nechať vykonať automatickú koregistráciu. Tieto posuny sa zapisujú do výstupného súboru.



Obr. 28. Vizualizácia reziduí medzi modelom a pozorov. pri jemnej koregistrácii

Ďalším dôležitým parametrom je hodnota prahu koherencie, ktorá vyfiltruje odhady s koreláciou pod touto hodnotou. Korelácia je indikovaná podľa veľkosti jednotlivých kruhov. V tomto prípade bol limit prahu koherencie nastavený na 0,3. Zdá sa, že ide o dobré geometrické rozloženie okien nad plochou, bez väčšieho počtu vonkajších odhadov. Môžeme si všimnúť, že tento program ukazuje smer a amplitúdu odhadovaných vektorov offsetu. Dôležité je, že vizualizované vektory sú „hladké“, to znamená, že môžu byť modelované pomocou polynómu. Pre interpretáciu je znázornená len časť snímku. Smer vektorov je takmer rovnobežný, ale vektory nie sú vodorovné. Väčšina vektorov znázorňuje posun v smere sever až severovýchod a preto bola hodnota stupňa posunu nastavená na 2, čo je v tomto prípade vhodnejšie ako stupeň 1, ktorý sa nastavuje pri vodorovných posunoch. Polynóm 2. stupňa sa používa pri väčšine typov terénu, pretože primerane modeluje skreslenie slave snímku s ohľadom na master snímok. Zelené polygóny (kruhy) predstavujú mieru koherencie medzi posunmi. Vektory presahujúce mimo vybranú oblasť znázorňujú vonkajšie odhady (*outliers*, odľahlé hodnoty posunov.)

8.9 Interpolácia a prevzorkovanie

Interpolácia je metóda, kedy sa pri spracovaní dát dopočítavajú body, z ktorých sa skladá snímok - porovnaním s fyzicky existujúcimi bodmi. Ide o výpočet, v ktorom sa zväčšuje počet zobrazovacích bodov.

8.9.1 RELTIMING

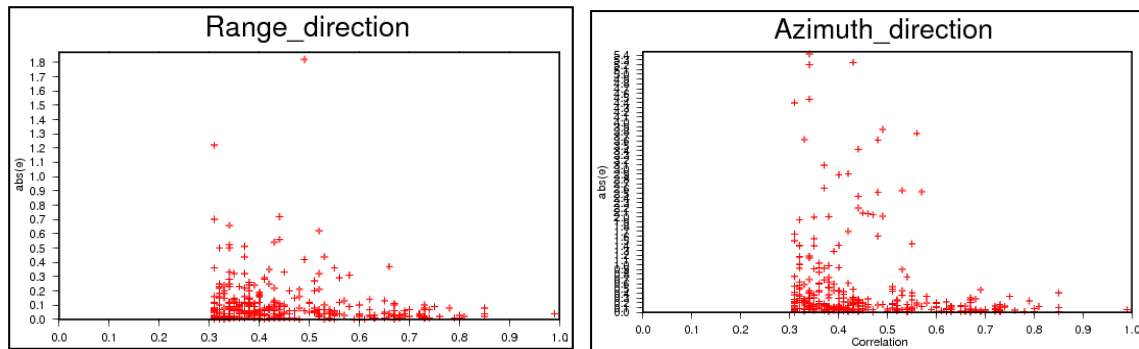
Relatívna časová chyba medzi master a slave snímkou je vypočítaná s použitím presných orbít a výsledkov koregistrácie. Preto môže byť tento krok prevádzaný len po krokoch COARSEORB a FINE. Časová chyba sa odhaduje v smere azimutu, rovnako ako aj v smere rozsahu. Tento krok má vplyv na koregistráciu s použitím DEM (krok DEMASSIST). Pre túto koregistráciu master a slave snímku by mali byť snímky zarovnané čo najpresnejšie. Hlavný snímok sa zarovnáva s použitím snímku simulovanej amplitúdy (krok M_TIMING).

8.9.2 DEMASSIST

Pre každý pixel hlavného snímku sú vypočítané odpovedajúce (reálne hodnoty) súradníc vo vedľajšom snímku. Pre tento krok je potrebný digitálny model terénu (napr. SRTM). Použitie koregistrácie pomocou DEM nie je závislé na korelácii medzi master a slave snímkou. Je však potrebné zabrániť chybe koregistrácie v dôsledku zlej distribúcie alebo nedostatku korelačných okien. Okrem toho sa koregistrácia zvyšuje v prípade veľkej interferometrickej základne a silnej topografie. Vo vstupnom súbore sa nastavuje názov DEM súboru (v rastrovom formáte), formát súboru, počet riadkov a stĺpcov vo vstupnom súbore, rozostúpenie gridu (mriežky), ktoré sa udáva ako zemepisná šírka a dĺžka ako aj meno výstupného súboru s výškami DEM-u v radarových súradniciach.

8.9.3 COREGPM

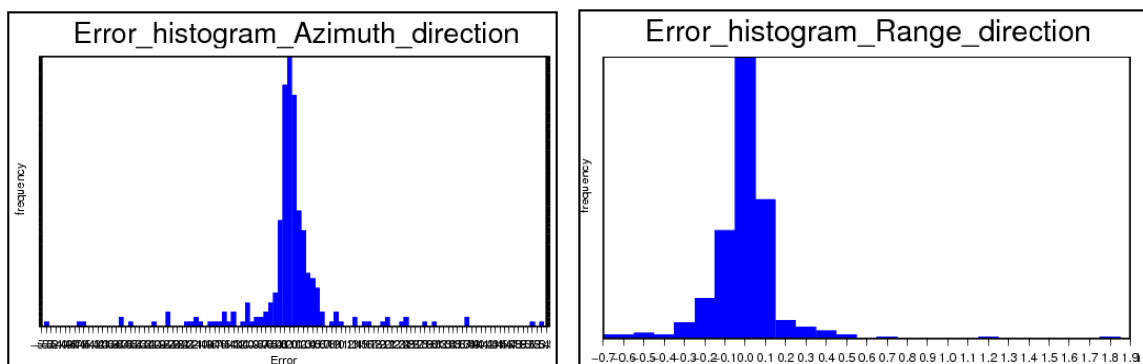
Pri interpolácii sú výsledky z kroku FINE, pri ktorom boli spočítané hodnoty offsetu (posunu) s odlišnou spoľahlivosťou, následne preložené polynomicou funkciou nízkeho stupňa (túto funkciu je potrebné zadať) nazvanou COREGMP. Chybové hodnoty môžu byť vylúčené manuálne úpravou potrebného súboru alebo automaticky nastavením prahovej hodnoty pre mieru korelácie. Táto hodnota bola opäť nastavená na 0,3. Tento krok je dôležitý, pretože interferogram je citlivý na nesprávne zarovnanie master a slave snímku. Odhadnuté vektory s koherenciou menšou ako 0,3 sú odstránené (maximálne 100 vektorov, podľa nastavenia). O správnosti interpolácie nasvedčujú aj rozptylogram (*Obr. 29. Vizualizácia reziduí medzi modelom a pozorovaniami v smere rozsahu a v smere azimutu*) a histogram reziduí (*Obr. 30. Histogramy reziduí pre azimut a range*).



Obr. 29. Vizualizácia reziduí medzi modelom a pozorov. v smere rozsahu a v smere azimutu.

Väčšina reziduí je menšia ako 0,2 pixelu.

Abs(e) znamená absolútnu chybu, čiže rozdiel medzi odhadovaným posunom a pozorovaným posunom medzi master a slave snímku v smere rozsahu aj v smere azimutu. Väčšina reziduí je menšia ako 0,2 pixelu, čo znamená, že posun medzi master a slave snímku je len 0,2 pixelu a tým došlo k dostatočnému prekrytiu snímok.



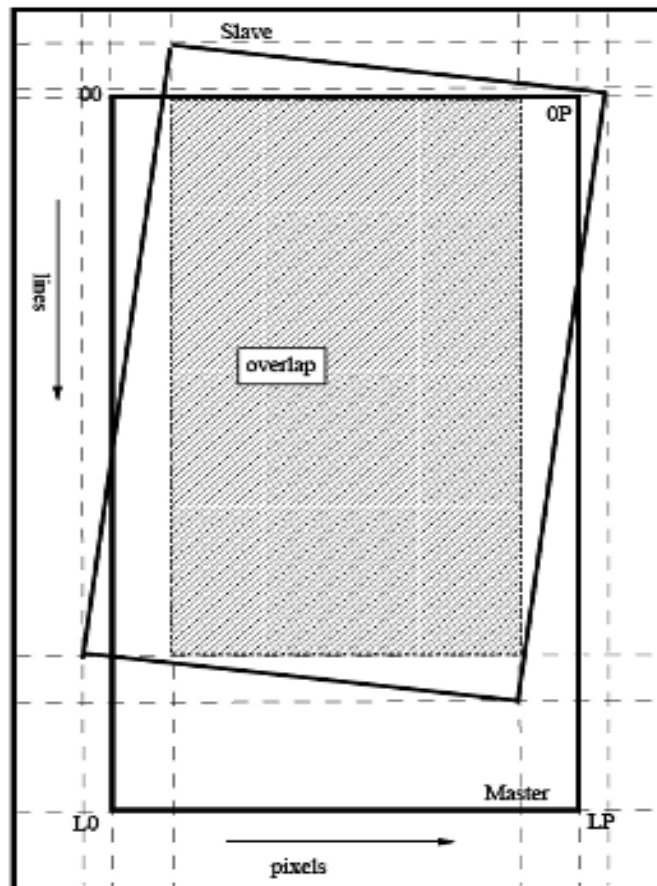
Obr. 30. Histogramy reziduí pre azimut a range

Smerodatná odchýlka reziduí je približne 0,1 pixelu. Odchýlka je opäť celkom malá, čo poukazuje na navzájom podobné posuny medzi snímkami. Naopak, ak je smerodatná odchýlka pomerne veľká, jednotlivé posuny sú odlišné.

8.9.4 RESAMPLE

Ďalším krokom spracovania je prevzorkovanie. Prevzorkovanie znamená zmenu rozlíšenia snímku v dôsledku zmien rozmerov snímok v obrazových bodoch. V programe Doris na tento účel slúži modul RESAMPLE. Ten aplikuje vypočítané hodnoty a prevzorkuje všetky pixely slave snímku na grid master snímku (viď. Obr. 31. Definícia preloženia medzi master a slave snímku). Tento krok môže byť časovo pomerne náročný. Ako parametre vstupného súboru nastavujeme metódu prevzorkovania, názov výstupného slave súboru, formát výstupu, súradnice stredu snímku a výšku a šírku snímku v pixloch. Ak sedia oba

snímky presne na sebe, je možné ich fázu jednoducho pixel po pixelu odčítať. Po prevzorkovaní sa obrazy filtrujú v smere range, čím dôjde aj k orezaniu neprekrývajúcich sa častí snímok. V Dorise to má na starosti modul FILTRANGE.



Obr. 31. Definícia preloženia medzi master a slave snímkou , prevzaté z [28]

8.9.5 FILTRANGE

Tento krok filtruje spektrá v smere rozsahu master a slave snímku, čím redukuje šum v interferograme. Redukcia šumu pri filtrácii vplyva na neprekrývajúce sa časti spektra. Toto neprekrývajúce sa spektrum v celom rozsahu medzi master a slave snímkou je spôsobené mierne odlišným uhlom pohľadu oboch snímačov. Čím dlhšia je kolmá základňa, tým menšie sú prekrývajúce sa časti. Krok sa vykonáva po hrubej koregistrácii, pretože toto približné prekrytie sa používa pri filtrovaní oboch snímok. Výstupné snímky sú orezané podľa tohto prekrytia. Dôležitým parametrom kroku je metóda filtrácie. Doris používa dve metódy filtrácie, filtráciu založenú na orbitách (za predpokladu konštantného sklonu terénu) a adaptívny filter. Pre mierne hornatý terén oblasti je vhodnejšie použiť adaptívnu filtráciu,

ale je to výpočtovo náročnejšie. Podľa [4] sa táto metóda vykonáva až po prevzorkovaní slave snímku na master snímok, pretože okrajová frekvencia sa odhaduje z interferogramu (je čiastočne vypočítaná). Vykonáva sa simultánne pre master aj slave snímok. Master a slave snímky sú spracované v rovnakom čase, pretože filter je úplne rovnaký pre oba obrazy, len sú posunuté. Dôležitá je dĺžka okna v rozsahu pixelov, ktorá sa vzťahuje k dĺžke terénu, u ktorého sa predpokladá, že má konštantný sklon. Hodnota bola nastavená na 128 pixelov, čo zodpovedá približne 2500 m.

8.10 Komplexný interferogram

Interferogram získame ako kombináciu výpočtov viacerých krokov. Celkový interferogram je vytvorený komplexným násobením korešpondujúcich si pixelov v oboch snímkach, pričom dôjde k násobeniu amplitúd a odčítaniu fáz. Aj keď je to hlavne fáza, ktorá je dôležitá pre interferometriu, komplexná hodnota interferogramu sa zachováva pre ďalšie výpočty. V tomto prípade bol tento krok uskutočnený modulom INTERFERO.

8.10.1 INTERFERO

Krok INTERFERO spočíta komplexný interferogram. Fázy dvoch odpovedajúcich si scén sú bod po bode (obrazové body) odčítané. Vypočítaný interferogram v sebe obsahuje aj vplyv fázy referenčného elipsoidu, ktorú je potrebné odstrániť. Chceme, aby sa rovinné územie (plocha elipsoidu) zobrazilo bez interferometrických prúžkov. V tomto prípade bol multilook faktor nastavený na hodnotu 5 v smere azimutu a na hodnotu 1 v smere rozsahu. Keďže interferometrická základňa je skôr väčšia, očakáva sa väčší počet prúžkov (*fringes*) v dôsledku plochej Zeme. Preto musí byť tento faktor v smere rozsahu 1, aby došlo k odčítaniu plochej Zeme. Multilook faktor znižuje veľkosť súboru a naopak zvyšuje pomer *signál - šum* a to aj za cenu rozlíšenia. Rozlíšenie pixelov je pri použití pomeru 5:1 približne 20x20 m.

8.10.2 COMPREFPHA

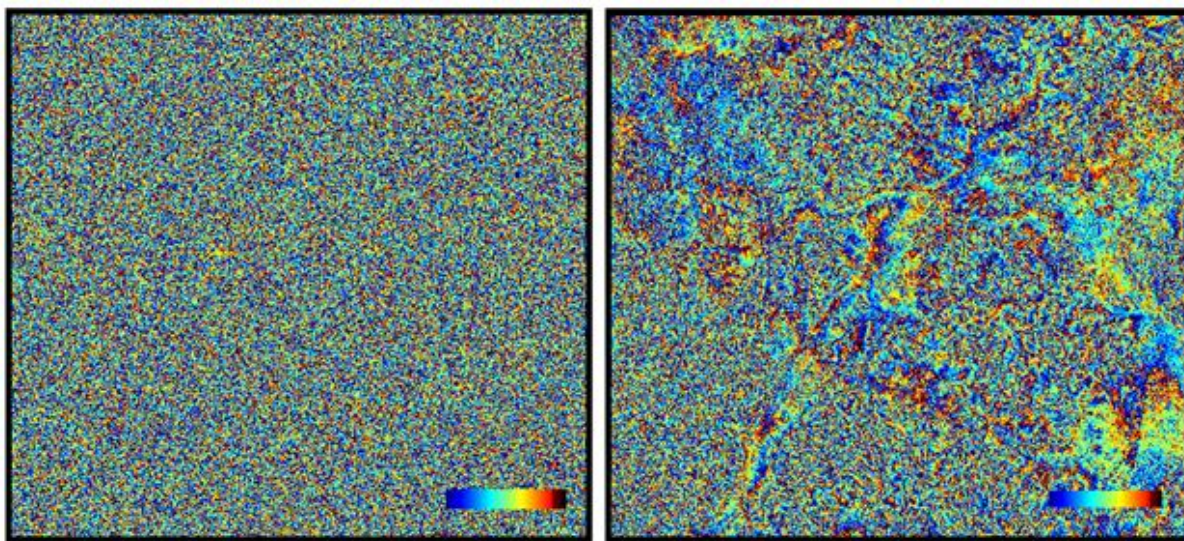
Krok COMPREFPHA vypočíta „flat-Earth fázu“ (fáza plochej Zeme). Platí, že fáza prijatého signálu (tj. rozdiel medzi prijatým a vyslaným signálom) závisí na vzdialenosti medzi vysielacom/prijímačom a odrážačom. Cieľom je, aby boli fázy interferogramu zhodné, pokiaľ zobrazovaná oblasť nemá topografiu. Obrázok (*Obr. 32. Interferometrická fáza vrátane "flat earth" fázy*) ukazuje interferometrickú fázu, stále vrátane fázy plochej Zeme. Prúžky interferometrickej fázy sú však príliš husté, nie je možné ich dostatočne vidieť. Po

odpočítaní fázy plochej Zeme sú prúžky oveľa jasnejšie a odpovedajú topografii (Obr. 33. *Interferometrická fáza po odpočítaní "flat earth" fázy*).

8.10.3 SUBTRREFPHA

Krok SUBTRREFPHA má na starosti odčítanie „flat-Earth fázy“ (fáza plochej Zeme) od interferogramu. Pre interferometrické spracovanie potrebujeme vždy aspoň dva snímky tej istej oblasti. V prípade, že chceme skúmať topografiu daného územia, musia byť tieto snímky získané pod mierne odlišným uhlom. To znamená, že kolmá základňa nesmie byť nulová. Ak chceme skúmať deformácie na danom území, je potrebná nulová dĺžka kolmej základne.

Opäť sa tu nastavuje multi-look faktor, v tomto prípade bol zvolený pomer 2:2, čo predstavuje rozostúpenie pixelov asi 40x40 m. Pred odčítaním sa interferogram skladá z rovnobežných riadkov v smere azimutu. Po odčítaní je v interferograme najvýraznejším prvkom topografia.



Obr. 32. *Inter. fáza vrátane "flat earth" fázy* Obr. 33. *Inter. fáza po odpočítaní "flat earth"*

Snímky zobrazujú len 10 % z celkového obrazu, ide o stred snímky (okolie Ostravy), pretože prúžky interferometrickej fázy sú príliš husté, v celom obraze ich nie je možné dostatočne vidieť. Fáza „flat earth“ je jasne viditeľná ako trend interferogramu (Obr. 32. *Interferometrická fáza vrátane "flat earth" fázy*) a po jej odčítaní sa v interferograme zvýraznila topografia. Snímok na Obr. 33. predstavuje deltu rieky Odry (Bohumín, Ostrava – Nová Ves, Zábřeh, Výškovice, Klimkovice, Studénka, Bartošovice). Oblasť záujmu je bližšie definovaná v kap. 9. *VYHODNOTENIE INTERFEROMETRICKÉHO SPRACOVANIA*.

Farebná škála predstavuje rozsah hodnôt od $-\pi$ do π (viď. Obr. 34. Farebná škála, ktorá predstavuje rozsah hodnôt od $-\pi$ do π). Charakteristika elektromagnetickej vlny je vysvetlaná v kapitole 5.1 Základné princípy a pojmy .



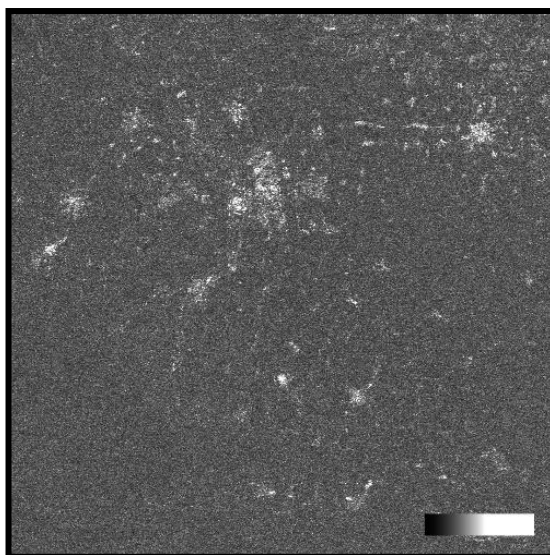
Obr. 34. Farebná škála, ktorá predstavuje rozsah hodnôt od $-\pi$ do π

8.10.4 COHERENCE

Krok COHERENCE spočíta koherenciu ako mieru spoľahlivosti fázy v malom okolí obrazového bodu (fáza je náhodná hodnota v nekorelovanej oblasti), uvádza [13]. Koherencia znázorňuje v každom bode snímku mieru korelácie medzi dvoma použitými snímkami, pričom korelácia je miera štatistickej podobnosti dvoch signálov. Hodnoty koherencie sa pohybujú v rozmedzí 0 až 1 a v koherentnej mape sú interpretované stupňami šedej (viď Obr. 35. Mapa koherencie pre interferogram páru z 19.2.1996 a 29.4.1996, ERS-2). V interferograme sú väčšinou oblasti s nízkou koherenciou zobrazované zrnito. Hodnote 0 odpovedá čierna farba a znamená to, že informácie obsiahnuté vo fáze je kompletne znehodnotená šumom a oproti tomu hodnote 1 potom odpovedá biela farba a tá udáva, že nedošlo k žiadnemu vplyvu fázového šumu. Koherencia je teda istá miera stability fázy medzi dvoma snímkami. Fázové chyby sa potom prejavujú zníženou hodnotou koherencie. Nízka koherencia sa nazýva dekorelácia. Príčiny dekorelácie môžu byť rôzne: zlý výber snímkov (môže nekorelovať i celý interferogram), výskyt vegetácie (je neustále v pohybe), vodné plochy (ktoré sú veľmi dobrým hladkým odrážačom, takže radarový signál sa nevracia späť k družici), nesúrodé zosuvy, úpravy povrchov. Koherenčné obrazy závisia na veľkosti okna, v ktorom výpočet prebieha. Ak je toto okno malé, na snímku je možné vidieť i malé oblasti so stabilnou fázou, ale stráca sa štatistický význam koherencie.

Hodnota koherencie:

- 0.3 - 0.5 – koherencia je použiteľná, ale rušivá
- 0.5 - 0.7 – koherencia je dobrá
- 0.7 - 1.0 – koherencia je vynikajúca



Obr. 35. Mapa koherencie pre interferogram páru z 19.2.1996 a 29.4.1996, ERS-2

Koherencia ako parameter klasifikácie terénu:

- veľmi nízka koherencia – väčšinou vodné plochy
- stredná koherencia – rýchlo rastúca alebo pohybujúca sa vegetácia
- vysoká koherencia - púšte, mestá alebo iné stabilné prvky

Snímok má celkovo nízku koherenciu, čím predpokladáme, že sa medzi získaním radarových dát oboma družicami zmenili vlastnosti odrazivosti terénu a to takmer na celej ploche záujmového územia. Príčinou môže byť prítomnosť vegetácie, ktorá je pohyblivá a to najmä v hornatých oblastiach. Oblasť záujmu pokrýva prevažne SZ časť pohoria Moravskoslezské Beskydy alebo tiež Oderské vrchy, kde sa v dobe snímania daného územia už vegetácia alebo rastlinný porast plne rozvinul. Na snímku však vidíme aj miesta s vysokou koherenciou, čo sú v tomto prípade mestá, mestské oblasti a zastavané územia so stabilnými prvkami.

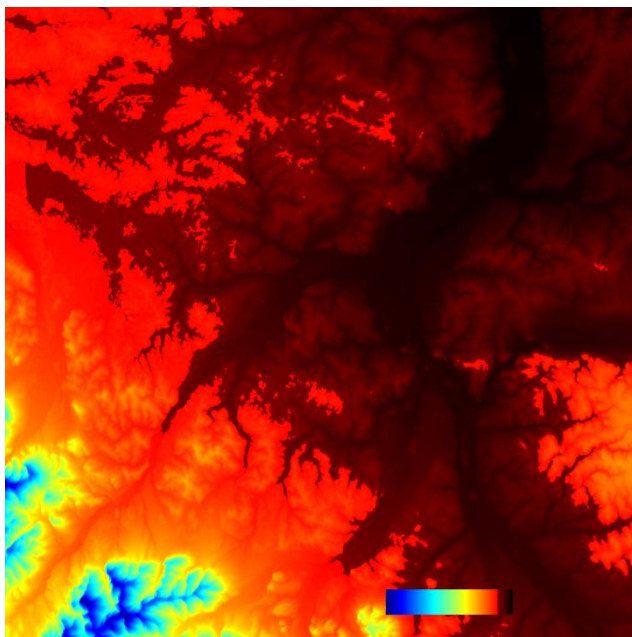
8.11 Výpočet DMT

Kroky vysvetlené v tejto kapitole sú nevyhnutné v prípade využitia metódy dvoch preletov, kedy sa pre účely diferenciálnej interferometrie využíva externý digitálny model terénu. K tomuto účelu slúžia kroky COMPREFDEM a SUBTREFDEM. Ak chceme z interferogramu vygenerovať DMR, je potrebné interferogram rozbaľiť a geokódovať, napr. podľa informácií o polohe družíc. Táto poloha je však dosť nepresná a chyby v DMR sú podstatné, preto je lepšie pri geokódovaní využívať identické body. Ako uvádza [19] ,

negeokódovaný DMR alebo DMR geokódovaný s využitím informácií o polohe družíc sa využíva len pri odčítaní topografickej zložky z iného interferogramu.

8.11.1 COMPREFDEM

Krok COMPREFDEM vypočíta fázu odpovedajúcu danému DMT, teda konvertuje DMT do súradnicového systému radaru. Potom DMT vyzerá ako interferogram bez šumu a dekorelovaných oblastí, pričom sa spočíta fáza, ktorá takémuto terénu zodpovedá (*Obr. 36. Digitálny model terénu konvertovaný do systému radaru*). Farebná škála predstavuje výškový rozdiel hodnôt v metroch. Modrá farba predstavuje miesta s najvyššou nadmorskou výškou, ktorá postupne klesá až k hnedej farbe, ktorá predstavuje miesta s najnižšou nadmorskou výškou.



Obr. 36. Digitálny model terénu konvertovaný do systému radaru

8.11.2 SUBTRREFDEM

Krok SUBTRREFDEM odčíta od interferogramu digitálny model terénu, vypočítaný v kroku COMPREFDEM. Cieľom je eliminovať topografický signál odčítaním externého digitálneho výškového modelu.

8.12 FILTPHASE

Krok FILTPHASE vyfiltruje fázu s cieľom znížiť šum radarového obrazu, napríklad pred vizualizáciou alebo pre zlepšenie fázového rozbalenia. Pri tomto kroku môžu byť použité rôzne filtre ako napríklad *goldstein*, ktorý zaostrí jednotlivé prúžky tak, že pri výpočte

priradí vrcholom spektrálnych prúžkov väčšiu váhu. Ďalší filter, ktorý sa dá v Dorise použiť je nazvaný *spatialconv*, ktorý pomocou konvolučnej funkcie počíta vážené priemerné hodnoty pod preddefinovaným pohyblivým oknom. Posledná metóda sa nazýva *spectral* a ide o použitie filtra, ktorý sa dá definovať vo vstupnom súbore (použitie napríklad nízko-frekvenčného filtru).

8.13 Rozbalenie interferometrickej fázy

Rozbalenie fázy je jedným z najproblematickejších krokov radarovej interferometrie, ale v programe Doris nie je tento krok implementovaný. Preto je potrebné k tomuto kroku využiť napr. program SNAPHU. Interferogram zbavený vplyvu referenčnej fázy obsahuje informáciu o relatívnej výške terénu, ktorá je však neurčitá. Všetky výšky sú zabalené do 2π fázového cyklu. Jeden fázový cyklus zodpovedá výškovému cyklu. Fázový rozdiel medzi dvoma bodmi na sploštenom interferograme potom udáva skutočný výškový rozdiel, ku ktorému sa pripočítava celočíselný násobok výškových cyklov. Proces, ktorý umožňuje priradiť jednotlivým interferometrickým prúžkom správny počet výškových cyklov sa nazýva rozbalenie fázy. Existuje niekoľko techník rozbalenia fázy, avšak treba dodať, že tento proces väčšinou nemá jednoznačné riešenie a k správnenému riešeniu je nutné často použiť známe informácie z terénu.

Oblasť Moravskoslezského kraja je pomerne svahovité územie a ako je zrejmé aj z vytvorených diferenciálnych interferogramov, ide o oblasť s nízkou koherenciou. Nasvedčuje tomu aj mapa koherencie, ktorá je v tomto prípade veľmi tmavá a šedá, z čoho vyplýva, že obraz je znehodnotený šumom a tým nie je možné použiť metódu rozbalenia interferometrickej fázy. Cieľom práce je posúdiť zmeny terénu na základe vypočítaných interferogramov, preto metóde rozbalenia interferometrickej fázy nie je venovaná ďalšia pozornosť.

8.14 SLANT2H

Tento krok počíta výšky v súradnicovom systéme radaru. Software DORIS umožňuje výpočet výšok v súradnicovom systéme radaru pomocou troch rôznych metód:

- metóda ambiguity - používa relatívny výškový rozdiel odpovedajúci rozsahu 2π
- metóda schwabisch - využíva polynómy k porovnaniu fázy s referenčnou fázou
- metóda rodriguez - využíva geometriu, prevzaté z [13].

8.15 GEOCODE

V tomto kroku sú radarom kódované výšky prevedené (konvertované) do referenčného systému Zeme. Vstupom je súbor výšok z kroku SLANT2H. Výstupom sú dva súbory obsahujúce šírku (χ) a dĺžku (λ) odpovedajúceho snímku. Tieto súbory môžu byť spracované ďalšími programami cpxfiddle, proj alebo GMT, kde je možné vytvoriť DEM v pravidelnej mriežke zvolenej projekcie (napr. UTM).

8.16 DinSAR

Táto kapitola opisuje spracovanie kroku DINSAR, čo znamená diferenciálna trojsnímková (trojobletová) interferometria. Ide o metódu na odstránenie topografickej fáze od interferogramu obsahujúceho topografiu, deformácie a atmosféru. Porovnáva fázovú zložku dvoch a viacerých radarových snímok. Tento modul môže byť tiež použitý na štúdium atmosférických javov v interferogramoch v prípade, ak sa neočakáva deformácia. Ako uvádza [8] možno tento krok vykonať v prípade rozbalených topografických interferogramov (topo pár) a interferogramov s komplexnou deformáciou (defo pár). Interferogramy musia mať opravenú fázu „flat earth“ (krok SUBTRREFPHA), musia byť prevzorkované (krok RESAMPLE). Súbory musia mať rovnaké multilook faktory a rovnaké rozmery (tj. presne sa prekrývajú).

8.17 Kvalita DMT z tandem párov

Kvalita výsledného digitálneho modelu terénu závisí na mnohých faktoroch. Jedným z nich je dĺžka kolmej základne. Pre tvorbu DMT je vhodné použiť čo najväčšiu možnú kolmú základňu, pretože potom fázový cyklus 2π odpovedá menšiemu výškovému rozdielu. Existujú však isté obmedzenia pre dĺžku kolmej základne. Pokiaľ by bola príliš dlhá, obsahoval by interferogram len šum. Preto existuje tzv. kritická dĺžka základne. Pre rovinatý terén je kritická základňa družice ERS približne 1.1 km [12]. Pre topografické mapovanie je však praktické voliť hodnoty maximálne okolo 500 m. Ďalším faktorom ovplyvňujúcim kvalitu DMT sú šum spôsobené vlastnosťami prijímača, časová dekorelácia (pre tandem-páry minimálna), chyby koregistrácie snímok, vplyv atmosféry, zrážkové činnosti a činnosť snehu ako aj typ povrchu a pokrývky, ktorý značne predurčuje hodnotu koherencie. Niektoré z týchto faktorov sa dajú vhodným spôsobom spracovania eliminovať, naďalej však v dátach zostáva vplyv atmosféry, typu pokrývky a povrchu i časová dekorelácia.

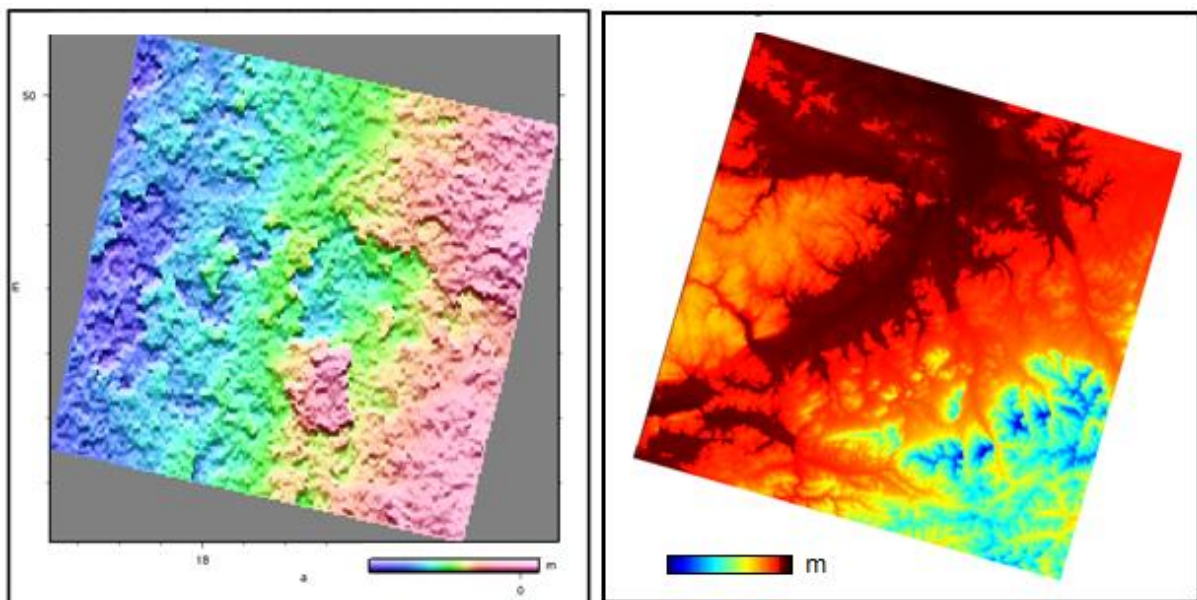
8.18 POSTPROCESSING

Po krokoch SLANT2H a GEOCODE, kedy je vytvorený súbor výšok, súbor so zemepisnou šírkou a súbor obsahujúci zemepisnú dĺžku odpovedajúcej snímky je potrebné tieto súbory interpolovať do mriežky zvolenej projekcie. K tomuto kroku poslúži GMT program so svojím skriptom. Proces sa spustí po zadaní nasledujúcich dvoch príkazov:

- lonlathei2ascii Outdata/lambda.raw Outdata/phi.raw Outdata/heights.raw lonlathei.dat
- ascii2ps lonlathei.dat

Prvý príkaz interpoluje vypočítanú výšku, šírku a dĺžku do súboru vo formáte *.dat a druhý príkaz umožní tento súbor vizualizovať.

Výsledkom interpolácie je model deformácii. Deformačný model na *Obr. 37. Model deformácii terénu vytvorený z interferometrickej fázy* vznikol ako produkt dvojsnímkovvej interferometrie, pričom v procese bola vyfiltrovaná fáza (krok FILTPHASE), zrušený DEM (SUBTRREFDEM) a referenčná fáza bola rozbalená (UNWRAP). Keďže v spracovaní bol odčítaný DEM (*Obr.38. Pôvodný DEM konvertovaný do systému radaru*), výsledný obraz predstavuje len deformácie terénu.



Obr. 37. Model deformácii terénu vytvorený z interferometrickej fázy

Obr.38. Pôvodný DEM konvertovaný do systému radaru

9. VYHODNOTENIE INTERFEROMETRICKÉHO SPRACOVANIA

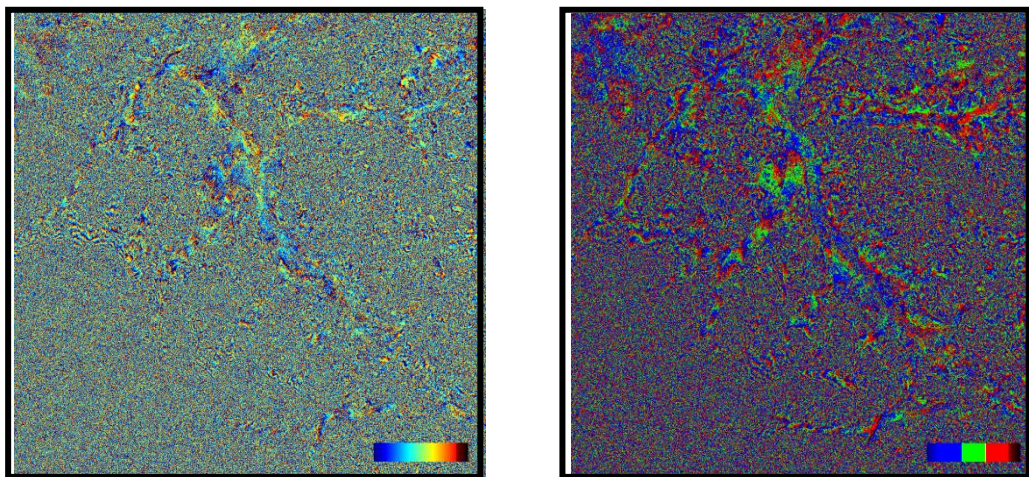
Na základe definovaných cieľov je hlavnou úlohou práce zistiť z vytvorených interferogramov vertikálne zmeny povrchu terénu. Postup práce a spracovania obrazov, popísaný v *kap. 8. TVORBA INTERFEROMETRICKÝCH PRODUKTOV*, je totožný pre všetky interferometrické produkty vytvorené v rámci tohto spracovania. Poskytnuté dáta pochádzajú z rôznych časových období a sú v tomto časovom úseku rovnomerne rozložené. Nasledujúca kapitola sa venuje interpretácii interferogramov vytvorených počas spracovania projektu.

Územie, o ktorom možno predpokladať, že sa tu vyskytujú nánosy alebo naopak odnosy pôdy a bahna, je na interferograme zobrazené jednoliatou farbou, rozdielnou od okolia a je vysoko koherentné (v koherenčnej mape sa zobrazuje bielou). Územie, ktoré je zasiahnuté odnosmi pôdy len pozvoľne, je lemované interferometrickými prúžkami. Interferogramy neobsahujú takmer žiadne prírodné prvky, preto bude veľmi ťažké ich lokalizovať v mape. Napriek tomu tu isté prvky je možné vidieť. Ide o vodné plochy a zastavané územia. A práve tieto prvky umožňujú presne lokalizovať danú oblasť.

Spracovanie je zamerané na oblasť Ostravy (definovanou súradnicami ľavého horného rohu snímku: 49°48'57.39"N, 18°13'24.239"E a počtom riadkov a stĺpcov v pomere 300:300), oblasť Opavy (definovanou súradnicami ľavého horného rohu snímku: 49°56'23.074"N, 17°54'6.474"E a počtom riadkov a stĺpcov v pomere 100:100) a taktiež na oblasť Karviná (definovanou súradnicami ľavého horného rohu snímku: 49°51'47.068"N, 18°32'46.748"E a počtom riadkov a stĺpcov v pomere 100:100), znázornené na snímkach bielymi polygónmi. Vygenerované snímky sú voči skutočnosti stranovo prevrátené (v dôsledku smeru snímania), ale pre potreby interpretácie sú transformované tak, aby odpovedali reálu.

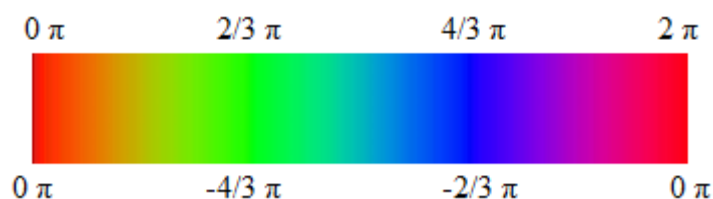
Po presnej lokalizácii vybraného územia nastáva analýza zmien terénu. Určité zmeny je možné pozorovať vo všetkých vytvorených interferogramoch. Na snímkoch môžeme vidieť veľa malých oblastí podozrivých zo zmeny terénu v rozsahu niekoľko centimetrov. Najväčšia zmena je zastúpená 2-4 prúžkami (1 prúžok predstavuje 2,8 cm), čo znamená nánosy pôdy takmer 6-12 cm za mesiac (35 dní, podľa doby snímania master a slave snímky). Okrem interferometrických prúžkov pozorujeme v interferograme aj veľké množstvo šumu, čo je spôsobené napr. vegetáciou alebo atmosférickými vplyvmi (dážď). Aby bolo možné určiť, či naozaj došlo k zmenám terénu, je potrebné analyzovať jednotlivé interferometrické prúžky. Lepšia interpretácia sa naskytne pri zvýraznení obrazu. Na zvýraznenie obrazu bola použitá metóda hustotných rezov. Ide o redukovanie počtu DN hodnôt obrazových prvkov (pixelov) v

pôvodnom radarovom obraze do menšieho počtu tried. Pôvodná RGB paleta bola indexovaná len na tri triedy (farby) – červenú, zelenú a modrú, čo naznačuje aj *Obr. 39. Rozdelenie obrazu do jednotlivých tried*. Hustotné rezy potlačia rozdiely vo vnútri definovaných intervalov (rezov) a zvýraznia rozdiely medzi jednotlivými triednymi intervalmi.



Obr. 39. Rozdelenie obrazu do jednotlivých tried

Ak je farebná škála jednotlivých prúžkov interferogramov v poradí BGR (blue-green-red), znamená to, že v tejto oblasti došlo poklesu terénu alebo odnosu pôdnej zložky (záporné hodnoty). Naopak, ak sú farby v poradí RGB (red-green-blue), znamená to, že v tejto oblasti došlo k vzostupu terénu a nánosom pôdy alebo bahna (kladné hodnoty). Farebná škála je znázornená na nasledujúcom obrázku (*Obr. 40. Farebná škála interferometrického prúžku*).



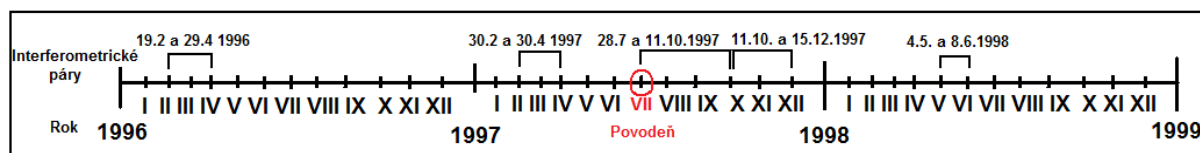
Obr. 40. Farebná škála interferometrického prúžku

Práca sa zameriava na zistenie vertikálnych zmien terénu po povodniach v Moravskoslezskom kraji. Keďže krajom pretekajú rieky ako Odra, Olše a Opava a práve v povodí týchto riek došlo v roku 1997 k povodňovej aktivite, štúdia sa zameriava na interpretáciu zmien terénu v oblastiach miest Ostrava, Opava a Karviná, ktorými tieto rieky pretekajú. Na snímkoch sú tieto oblasti ohraničené bielymi polygónmi. Nasledujúce snímky sú stranovo prevrátené, teda zaznamenávajú skutočnú polohu týchto miest. Postup spracovania je uvedený v kapitole 8., (kap. 8. *TVORBA INTERFEROMETRICKÝCH*

PRODUKTOV) a rovnakým spôsobom boli vytvorené všetky interferometrické produkty pre každý rok.

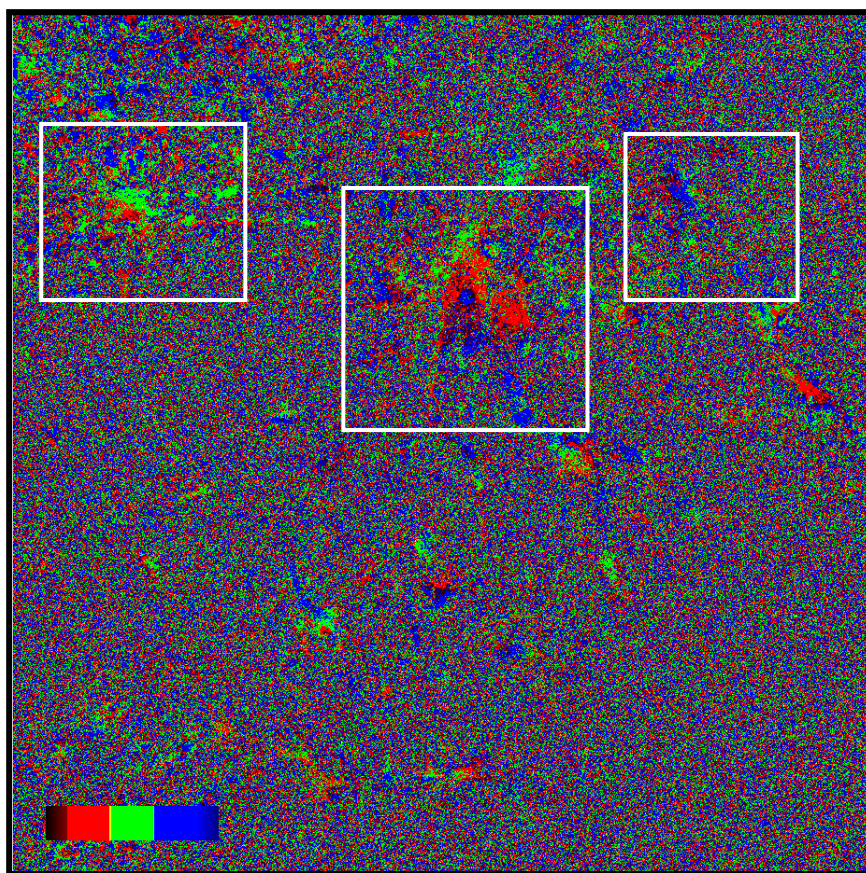
Ak máme k dispozícii dva radarové snímky z rovnakého územia, ktoré majú dobrú koherenciu a predpoklad nulových deformácií, môžeme porovnať túto fázovú zložku medzi odpovedajúcimi si pixlami na týchto snímkoch, a na základe tejto informácie vypočítať relatívne výškové členenie terénu. Navyše ak máme k dispozícii ešte ďalšie radarové snímky rovnakého územia, ale z inej doby, môžeme opäť na základe porovnávania fázovej zložky prevádzať výpočty zmien priestorového členenia daného územia a to v rôznych časových obdobiach.

Čo sa týka situácie pred povodňami, očakáva sa, že referenčná fáza ukáže stabilné prostredie alebo sa môže maximálne objaviť poklesový trend vo fáze. Môžu sa tu objaviť mierne nánosy v rozsahu niekoľko milimetrov. V období po povodniach sa očakáva opadávanie nánosov, ktoré mohli vzniknúť počas povodní.



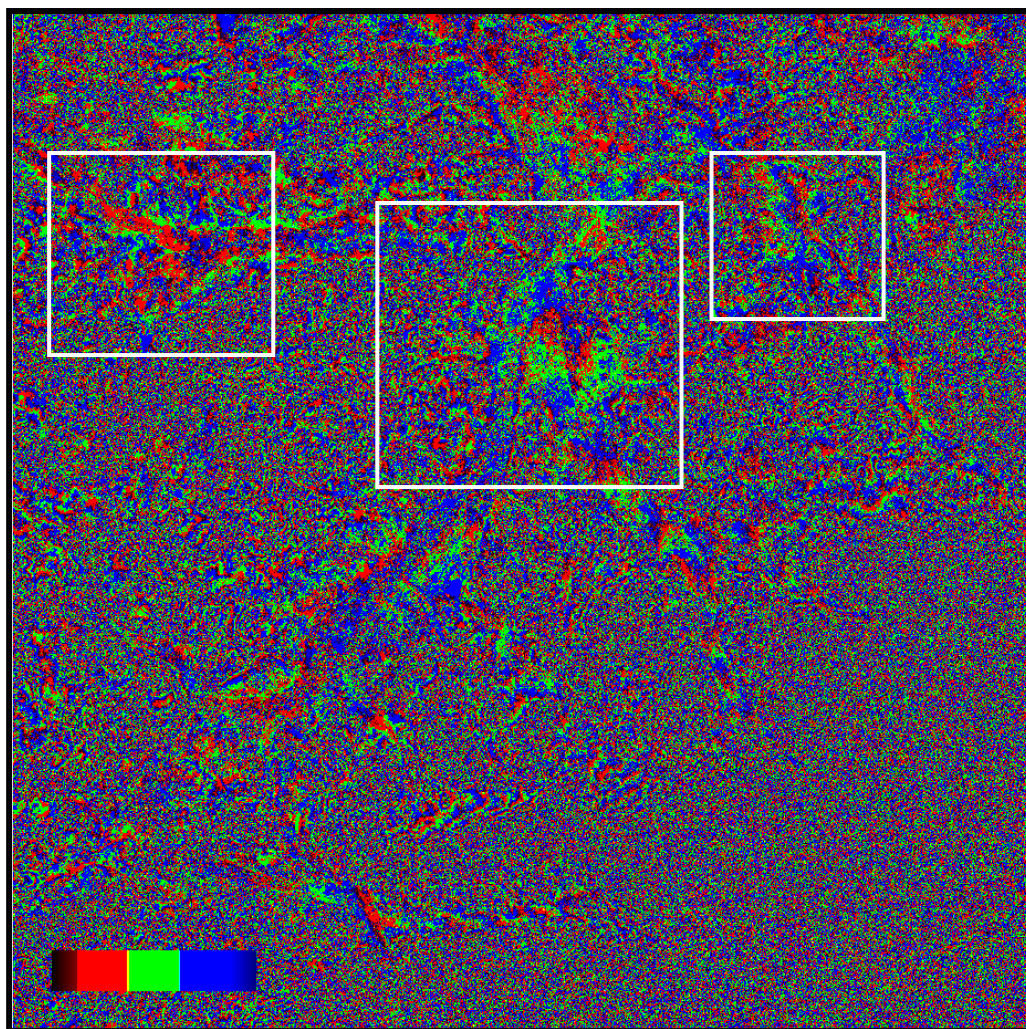
Obr. 41. Časová rada použitých snímok

Nasledujúce snímky znázorňujú referenčnú fázu interferogramov rok pred povodňami (Obr. 42. Referenčná fáza interferogramu páru z 19.2. a 29.4.1996, rok pred povodňami), dva mesiace po povodniach v 1997 (Obr. 43. Referenčná fáza interferogramu páru z 28.7.1997 a 11.10.1997) a rok po povodniach (Obr. 44. Referenčná fáza interferogramu páru z 4.5.1998 a 8.6.1998). Výber snímok v závislosti na čase predstavuje časová rada na Obr. 41. Časová rada použitých snímok.



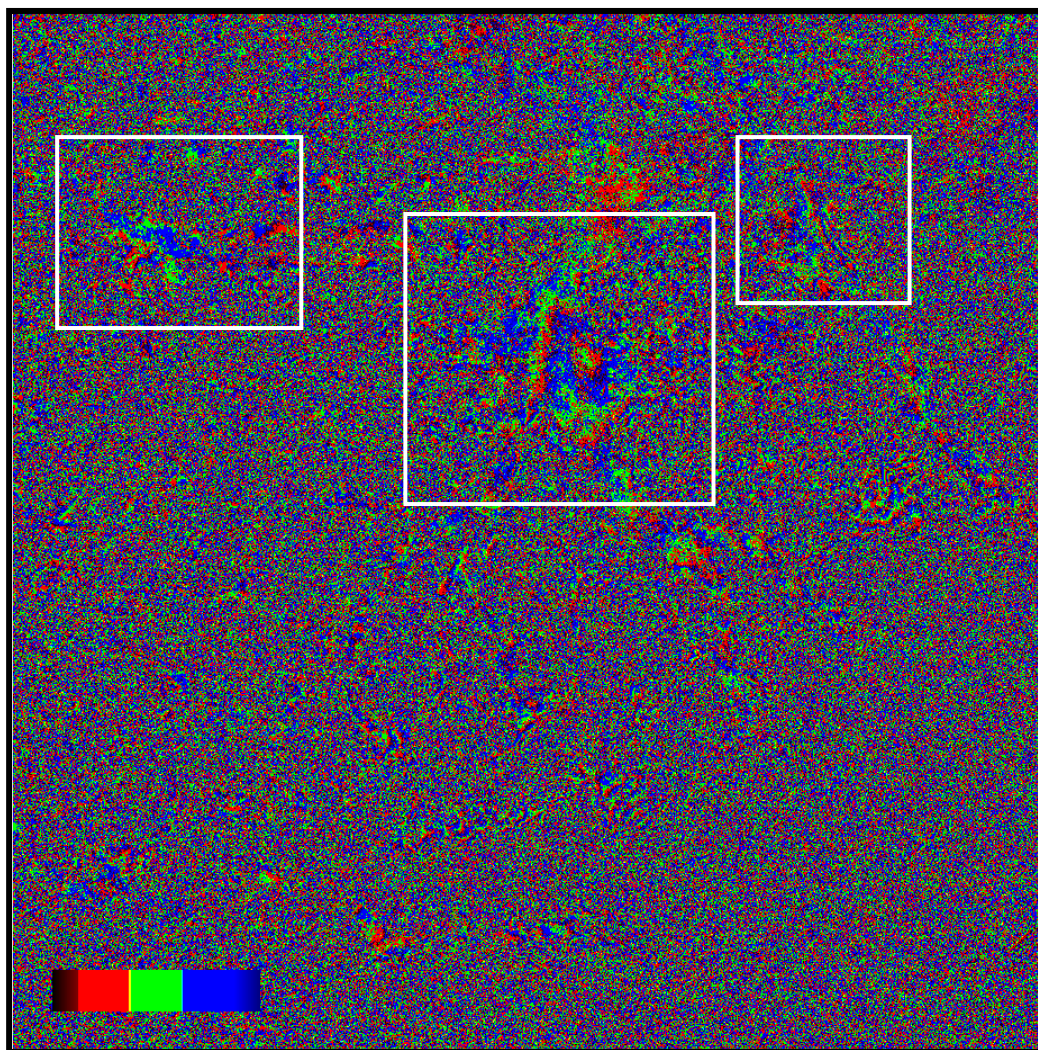
Obr. 42. Referenčná fáza interferogramu páru z 19.2. a 29.4.1996, rok pred povodňami

Oblasť Ostravy (v strede snímku) vykazuje určitú intenzitu interferometrických prúžkov, ale tieto prúžky netvoria sústredné kruhy, ako sa očakáva pri predpokladanej zmene terénu, či odnose pôdy a preto sa dá predpokladať, že môžu byť spôsobené atmosférickými vplyvmi alebo dĺžkou kolmej základne. Dĺžka kolmej základne interferogramu páru z 19.2. a 29.4. 1996 je 1272 m, čo presahuje kritickú hranicu 1100 m a tým vznikli aj „farebné flaky“ v snímku. Rovnaká situácia nastáva aj pre oblasť Karvinej (pravý polygón) a Opavy (ľavý polygón). Pôvodný radarový snímok referenčnej fázy je zobrazený v prílohe č. 4.



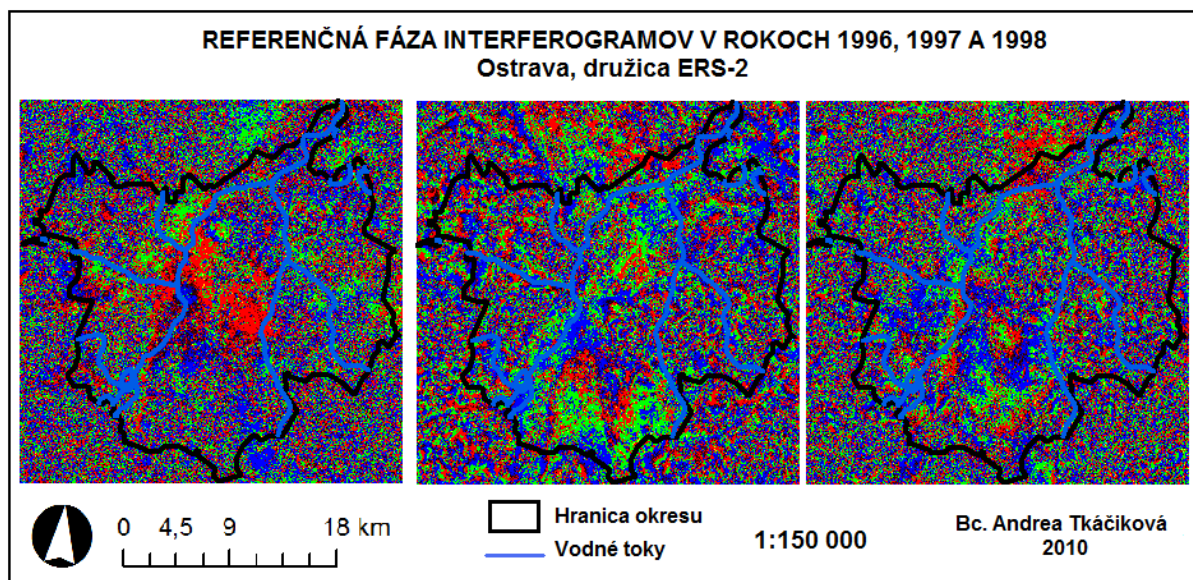
Obr. 43. Referenčná fáza interferogramu páru z 28.7.1997 a 11.10.1997, počas povodní

Predpokladá sa, že viac ako mesiac po povodniach je z hľadiska záplav už dostatočne dlhé časové obdobie a že voda spôsobená povodňovou činnosťou už ustúpila natolko, aby bolo možné posúdiť možné zmeny povrchu. Snímok referenčnej fázy bezprostredne po povodniach vykazuje už určité zmeny. Kolmá základňa interferogramu páru z 28.8. 1997 a 10.11. 1997 je v tomto prípade 281 m a tým fáza odpovedá menšiemu výškovému rozdielu. Dôkazom sú sústredné interferometrické prúžky pre všetky tri vybrané oblasti. Farebné prúžky sa ťahajú aj povodím rieky Odry v oblasti Ostravy ako aj povodím rieky Olše v Karvinej a na základe týchto prúžkov môžeme predpokladať isté zmeny povrchu, ale pri takomto globálnom pohľade na vybranú oblasť sa nedá s presnosťou určiť, či ide o zmenu alebo nie. Presnejšie informácie mi poskytne detailnejší pohľad na vybrané oblasti. Avšak v dôsledku slabšej koherencie medzi master snímkom z 28.7.1997 a slave snímkom z 11.10.1997 nie je možné ukázať celkový rozdiel medzi nánosmi. Pôvodný radarový snímok referenčnej fázy interferogramu páru z 28.7.1997 a 11.10.1997 je zobrazený v prílohe č. 5.



Obr. 44. Referenčná fáza interferogramu páru z 4.5.1998 a 8.6.1998, rok po povodni

Na rozdiel od roku 1997, kde snímok vykazuje pomerne hustú intenzitu interferometrických prúžkov, je rok 1998 na tieto prúžky „slabší“. Kolmá základňa interferogramu páru z 4.5.1998 a 8.6.1998 je 380 m. Opäť presnejšie informácie získame až z detailnejšieho pohľadu na jednotlivé oblasti. Ale už teraz môžeme predpokladať, že v oblasti Karvinej (pravý polygón na Obr. 44. Referenčná fáza interferogramu páru z 4.5.1998 a 8.6.1998, rok po povodni), čo je poddolované územie, mohlo dôjsť k zmene terénu a to na základe silnejšej intenzity interferometrických prúžkov. Príčinou môže byť opadávanie nánosov alebo samotný pokles terénu v dôsledku poddolovania. Pôvodný radarový snímok referenčnej fázy je zobrazený v prílohe č. 6.



Obr. 45. Referenčné fázy interferogramov pre oblasť Ostrava za rok 1996, 1997 a 1998

Tabuľka č. 3.: Základné parametre družicových snímok

Id snímku	Družica	Master Slave	Dátum snímania	Kolmá základňa[m]	Doppler centroid [Hz]	Oblačnosť	Zrážky [mm]
1996	ERS-2	master	19.2.1996	1277	187,296	bez	0
	ERS-2	slave	29.4.1996	1151	238,515	slabá	0
1997	ERS-2	master	28.7.1997	307	192,636	slabá	201 - 300
	ERS-2	slave	11.10.1997	0	179,381	mierna	0
1998	ERS-2	master	4.5.1998	754	265,161	bez	0
	ERS-2	slave	8.6.1998	1035	235,04	mierna	0

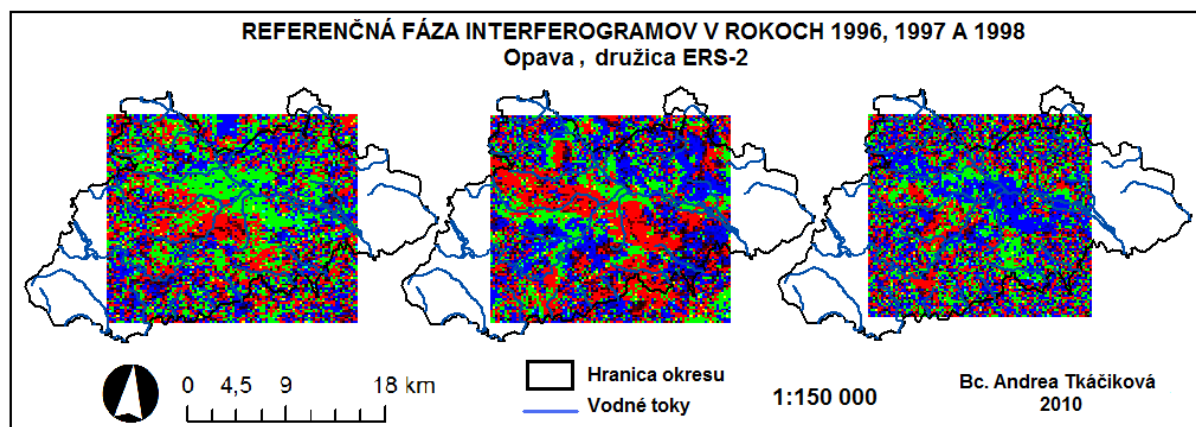
Detailný výrez na oblasť Ostravy, ako môžeme vidieť na obrázku Obr. 45. Referenčné fázy interferogramov pre oblasť Ostrava za rok 1996, 1997 a 1998, poskytuje ucelenejší pohľad na danú problematiku. Základné parametre družicových snímok uvádza Tabuľka č. 3. Základné parametre družicových snímok. Oblačnosť a úhrn zrážok v jednotlivých dňoch sú získané z ČHMÚ, [40].

Prvý snímok páru z 19.2.1996 a 29.4.1996 znázorňuje prevažne topografické prvky oblasti. Keďže všetky použité snímky majú zrušený DEM, na snímkoch referenčnej fázy by v tom prípade nemala byť vidieť topografia. Ale ako môžeme vidieť na prvom snímku Obr. 47. Referenčné fázy interferogramov pre oblasť Ostrava za rok 1996, 1997 a 1998, isté topografické prvky sa na snímku objavujú. Predpokladáme, že ide o zvyškovú topografiu spôsobenú nepresnosťou DEM. Rovnako by to mohol byť aj zvyškový trend po odčítaní "flat earth" fázy, ale ten sa na snímkoch príliš neopakuje, preto môžeme tento predpoklad vylúčiť.

Farebná škála snímku páru z 19.2.1996 a 29.4.1996 sa pohybuje v odtieňoch červenej a postupne prechádza do modrej farby okrem SZ časti, kde prechádza do zelenej farby. Podľa veľkosti referenčnej fázy predpokladáme, že ide o zvyšné topografické prvky, ktoré vznikli nepresnosťou pri odčítaní dvoch odpovedajúcich si scén.

Tento fakt však nepredpokladáme pri druhom snímku páru z 28.7.1997 a 10.11.1997. Interferometrické prúžky sú tu už výraznejšie. Samozrejme sú tu tiež prítomné prvky zvyškovej topografie, ale prúžky sa sústreďujú v povodí riek a to naznačuje, že tu došlo k určitej zmene. Ak sa zameriame na stred snímku, zistíme, že prechod modrej farby postupne k zelenej farbe naznačuje pokles terénu. Keďže jeden interferometrický prúžok predstavuje posun o 2,8 cm, predpokladáme, že mohlo dôjsť podľa počtu prúžkov k zmene terénu o 3 – 6 cm medzi master a slave snímkou. Môže ísť o odplavené zvyšky pôdy a bahna, ktoré sú prítomné na master snímku pred povodňami, ale už nie v slave snímku po povodniach.

V prípade snímku páru z 4.5.1998 a 8.6.1998 sa situácia v oblasti takmer nezmenila. Opäť predpokladáme zmenu terénu o 3 – 6 cm medzi master a slave snímkou a to podľa rovnakého počtu interferometrických prúžkov.



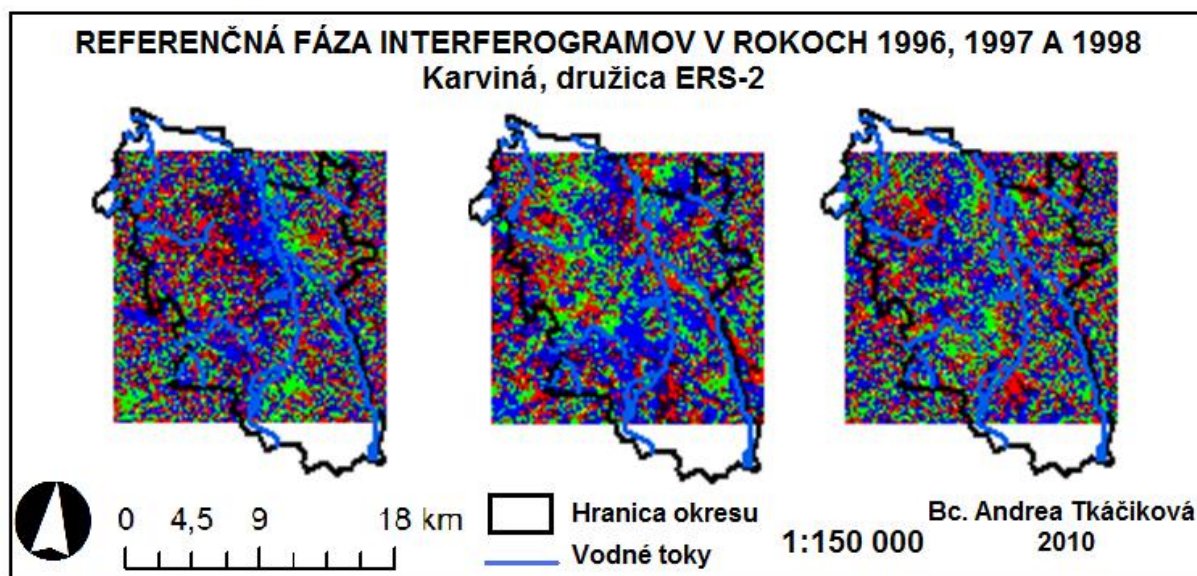
Obr. 46. Referenčné fázy interferogramov pre oblasť Opava za rok 1996, 1997 a 1998

Základné parametre družicových snímok sú opäť uvedené v *Tabuľke č. 3. Základné parametre družicových snímok*. Vo výreze z oblasti Opavy (Obr. 46. Referenčné fázy interferogramov pre oblasť Opava za rok 1996, 1997 a 1998) majú snímky menšie rozlíšenie, ale to nijako neovplyvní interpretáciu.

Prvý snímok páru z 19.2.1996 a 29.4.1996 znázorňuje opäť len zvyškovú topografiu oblasti. Snímok páru z 28.7.1997 a 11.10.1997 sa však mierne líši. Interferometrický prúžok obsahuje farebnú škálu v poradí RGB, čo znamená, že v oblasti došlo k určitým nánosom pôdy. Je tu viditeľný väčší počet výrazných interferometrických prúžkov (3 - 4), preto ide

s najväčšou pravdepodobnosťou o zmenu terénu v podobe nánosov pôdy a bahna o 9 – 12 cm za 75 dní, čiže medzi master snímkom z 28.7.1997 a slave snímkom z 10.11. 1997.

Snímok páru z 4.5.1998 a 8.6.1998 predstavuje jeden výrazný interferometrický prúžok, ale v poradí BGR, čiže tu došlo k poklesu terénu, ale len do 3 – 6 cm za 35 dní.



Obr. 47. Referenčné fázy interferogramov pre oblasť Karviná za rok 1996, 1997 a 1998

V oblasti Karviná sa situácia opakovala, (Obr. 47. Referenčné fázy interferogramov pre oblasť Karviná za rok 1996, 1997 a 1998). Zvyškové topografické prvky na prvom snímku 19.2.1996 a 29.4.1996 sú doplnené viacerými interferometrickými prúžkami farieb prevažne v poradí BGR, na druhom snímku páru z 28.7.1997 a 11.10.1997. Ide o zmenu terénu v forme poklesu, čiže odnosu pôdnej zložky a podľa počtu prúžkov až o 12 – 15 cm za 75 dní. V roku 1998 sa na snímku páru z 4.5.1998 a 8.6.1998 situácia výrazne nezmenila.

Tým môžeme preukázať, že v sledovaných územiach došlo k odnosu pôdnej zložky v rozsahu od niekoľkých milimetrov do niekoľkých centimetrov za 35 - 75 dní.

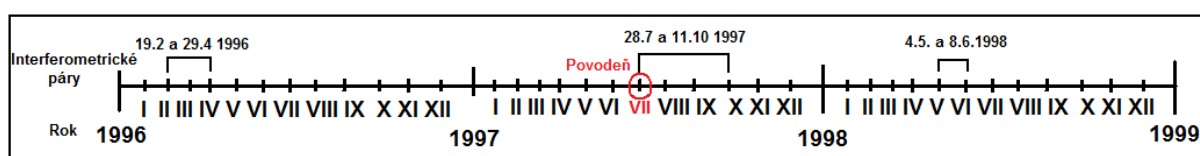
Predpokladáme, že pokles nastal predovšetkým v oblastiach, ktorými preteká rieka a v miestach, ktoré sú v bezprostrednej blízkosti vodnej plochy.

Najdôležitejším problémom spracovania projektu bol nedostatok dát, vhodných pre spracovanie. Nie je teda možné overiť, či sa tieto farebné fláky (interferometrické prúžky) objavujú aj na snímkach s inou časovou základňou a či tam k nejakým zmenám dochádza.

Na obrázkoch znázorňujúcich koherenciu týchto vybraných snímok je možné sledovať vývoj vodnej hladiny alebo zmeny tohto faktoru v čase. V kapitole 8.10.4 *COHERENCE* sú uvedené príčiny vzniku koherencie a klasifikačné parametre koherencie terénu. Kapitola uvádza, že veľmi nízku koherenciu majú väčšinou vodné toky a vodné plochy. Stredná koherencia sa vyskytuje u rýchlo rastúcej alebo pohybujúcej sa vegetácii a vysoká koherencia je typická pre zastavané oblasti, priemyselné parky, mestá, ale napr. aj púšte alebo iné stabilné prvky.

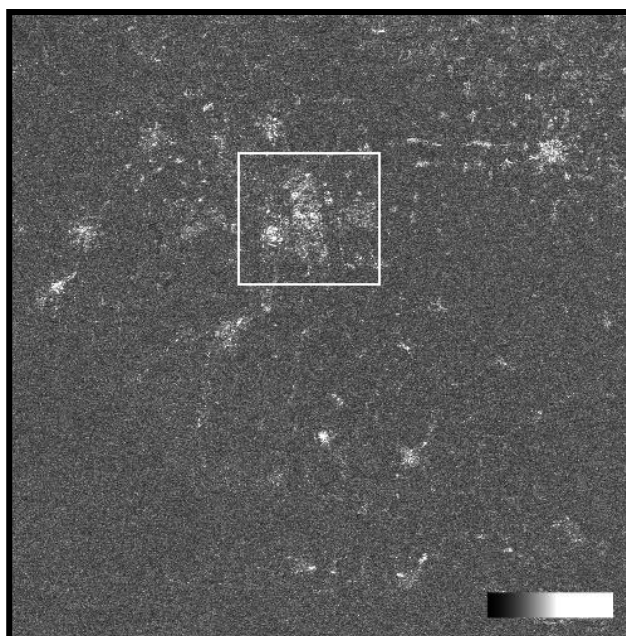
Vo všeobecnosti majú všetky koherenčné mapy spracované v projekte nízku koherenciu okrem oblastí miest a zastavaných území. A práve tu sa naskytuje možnosť interpretácie koherencie. Ako už bolo spomenuté, spracovanie je zamerané na oblasť Ostravy, na snímkoch znázornená bielym polygónom. Snímky sú pre lepšiu interpretáciu už stranovo prevrátené a odpovedajú skutočnej polohe.

Koherenčná mapa pre interferogram páru z 19.2.1996 a 29.4.1996 družice ERS-2 (*Obr. 49. Koherenčná mapa interferogramu páru z 19.2.1996 a 29.4.1996, rok pred povodňami*), čo je interferogram snímok rok pred povodňami a taktiež aj koherenčná mapa pre interferogram páru z 4.5.1998 a 8.6.1998 (*Obr. 51. Koherenčná mapa interferogramu páru z 4.5. 8 a 8.6.1998, rok po povodniach*), čo je interferogram snímok rok po povodni (*Obr. 48. Časová rada pre výber interferometrických párov*), majú nízku koherenciu. Ide o dekorelované snímky. Príčinou dekorelácie môžu byť napr. výskyt vegetácie (je neustále v pohybe), alebo prítomnosť vodných plôch (ktoré sú veľmi dobrým hladkým odrazáčom, takže radarový signál sa nevracia späť k družici) rovnako ako aj rôzne sezónne úpravy povrchov.

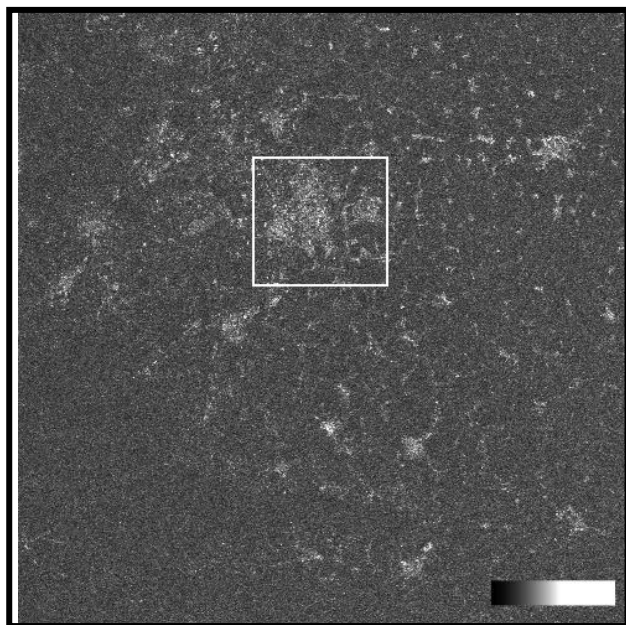


Obr. 48. Časová rada pre výber interferometrických párov

Pri porovnaní obrázkov *Obr. 49. Koherenčná mapa interferogramu páru z 19.2. a 29.4.1996, rok pred povodňami* a *Obr. 50. Koherenčná mapa interferogramu páru z 4.5. a 8.6.1998, rok po povodniach* zistíme, že na snímkoch nie je možné vidieť výraznú zmenu v koherencii. Tieto obrázky znázorňujú hodnotu koherencie vždy medzi master a slave snímkou daného páru. Podľa toho usudzujeme, že medzi master snímkou z 19.2. 1996 a slave snímkou z 29.4.1996 nedošlo k výraznej zmene. Rovnako môžeme interpretovať aj master snímok z 4.5. 1998 a slave snímok z 8.6.1998.



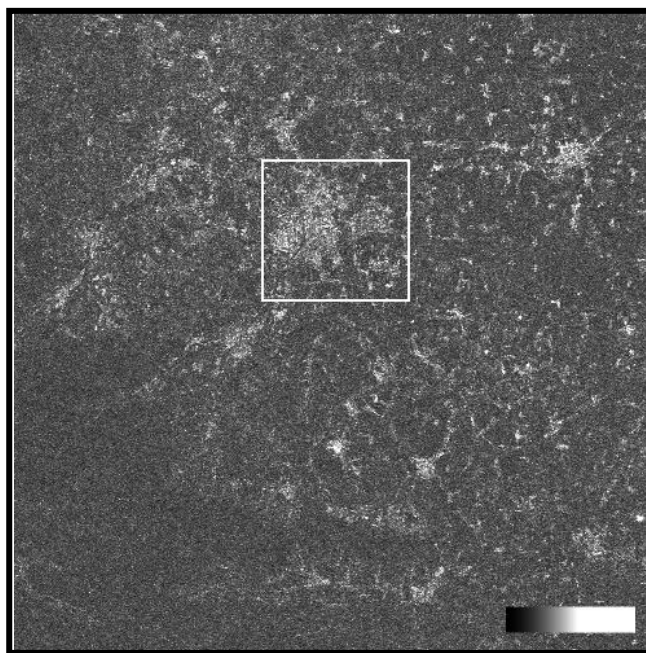
Obr. 49. Koherenčná mapa interferogramu páru z 19.2. a 29.4.1996, rok pred povodňami



Obr. 50. Koherenčná mapa interferogramu páru z 4.5. a 8.6.1998, rok po povodniach

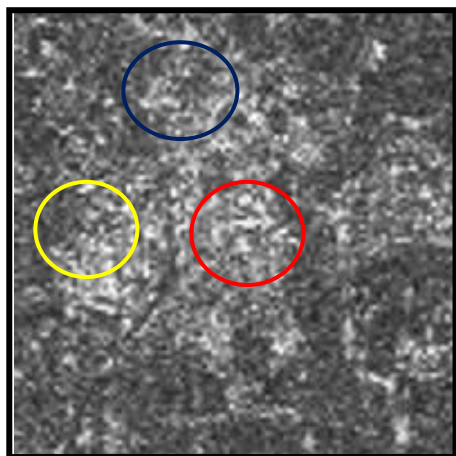
Z časovej osy vyplýva, že povodne nastali v siedmom mesiaci (4. – 11. 7. 1997). K tomuto obdobiu sa viaže koherenčná mapa interferogramu páru z 28.7.1997 a 11.10.1997 (Obr. 51. Koherenčná mapa interferogramu páru z 28.7.1997 a 11.10.1997, ERS-2). V období povodní bol povrch terénu zaplavený súvislou vodnou hladinou a práve táto vlhkosť značne ovplyvnila hodnotu koherencie. Tá sa v dôsledku nánosov pôdy a bahna výrazne znížila.

V koherenčnej mape sa táto zmena premietla v zmene farby. Je známe, že hodnoty koherencie sa udávajú od 0 do 1. Čierna farba odpovedá 0 a biela farba 1. Z toho vyplýva, že koherencia klesla pozdĺž rieky Odry, čo súvisí práve s vtedy prebiehajúcimi povodňami.



Obr. 51. Koherenčná mapa interferogramu páru z 28.7. a 11.10.1997, počas povodní

Detailnejší pohľad na oblasť Ostravy poskytuje obrázok 52. (Obr. 52. Výrez koherenčnej mapy z 28.7.1997 a 11.10.1997 pre oblasť Ostravy). Modrý polygón na snímke predstavuje oblasť Ostrava – Přívoz, žltý polygón ohraničuje oblasť Nová Ves a červená oblasť rysuje Vítkovice. Ako môžeme vidieť, koherencia je najnižšia v oblastiach, ktorými preteká rieka Odra. Čo sa týka oblasti Vítkovice, tu je vysoká koherencia z dôvodu vysokého počtu rozsiahlych budov. Budovy majú vhodnú geometriu, rovnako ako aj materiál pre odraz žiarenia. Navyše sú to stabilné prvky povrchu (sú veľmi dobrým plošným hladkým odrazáčom). Preto sú hodnoty koherencie pre oblasť Vítkovice v koherenčnej mape pomerne vysoké.



Obr. 52. Výrez koherenčnej mapy z 28.7.1997 a 11.10.1997 pre oblasť Ostravy

Na Obr. 52. Výrez koherenčnej mapy z 28.7.1997 a 11.10.1997 pre oblasť Ostravy je jasne viditeľná delta rieky Odry. Hodnota koherencie v povodí rieky sa znížila a tým sa zvýraznil priebeh rieky.

Tým, že v jednotlivých mapách koherencie pre príslušné obdobie sa hodnoty menia a výrazne v snímkoch kolíšu, môžem potvrdiť, že radarové dáta ako zdroj koherencie naozaj vypovedajú o prítomnosti vodnej vrstvy na povrchu Zeme.

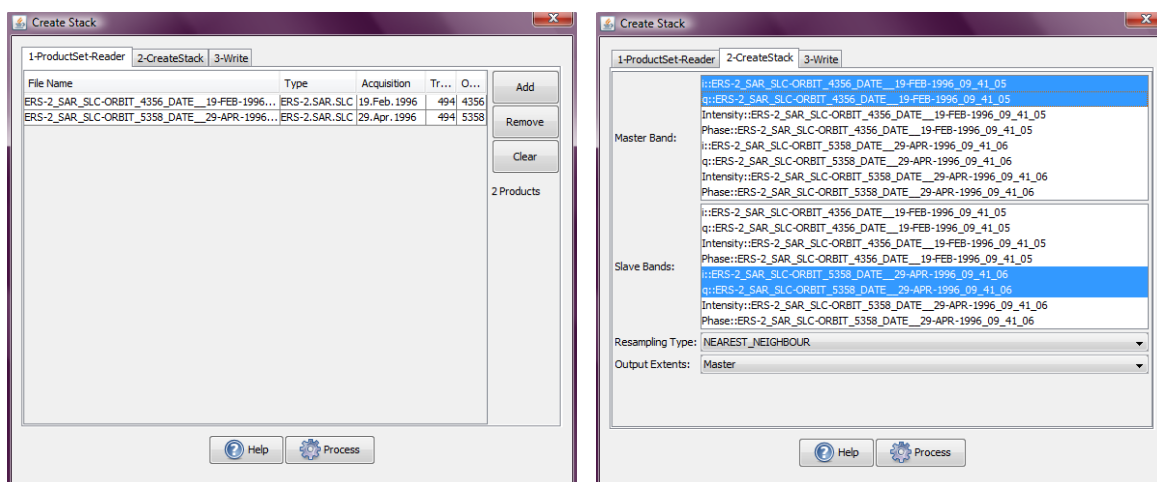
10. AMPLITÚDA SNÍMKOV

Okrem fázovej zložky nesie radarový obraz informácie aj o amplitúde. Amplitúdová zložka udáva intenzitu odrazeného žiarenia a popisuje najmä odrazivé vlastnosti povrchu a tým tento povrch polohopisne mapuje, uvádza [32]. Pri zobrazení radarových dát sú hodnotám amplitúdy priradené konkrétne farby. Najväčšej hodnote amplitúdy odpovedá biela farba, najnižšej hodnote potom farba čierna. Hodnotám medzi tým odpovedajú príslušné stupne šedej. Nasledujúca kapitola sa venuje stručnému popisu spracovania v danom programe a vyhodnoteniu spracovania.

V predchádzajúcich kapitolách som zisťovala zmeny terénu metódou radarovej interferometrie. Na základe interferogramov som zistila, v ktorých oblastiach došlo k nánosom bahna alebo naopak k odplaveniu a poklesom pôdnej hmoty. Výsledky a závery, ku ktorým som v priebehu spracovania dospela sa pokúsim interpretovať na základe dosiahnutej amplitúdy radarových snímok v programe NEST Software.

Rovnako ako pri interferometrickom spracovaní je potrebné zdrojové dáta koregistrovať. Podľa [1], koregistrácia radarových obrazov je pre interferometrické zobrazenie a tvorbu DEM veľmi zásadná. Ak chceme získať kvalitný obraz, je nutné obrazy koregistrovať so sub-pixlovou presnosťou. Koregistrácia je v programe plne automatická, nevyžaduje manuálny výber vlicovacích bodov pre master aj slave snímok. Radarové snímky sa môžu prekryvať čiastočne alebo úplne, môžu byť získané v rôznych časových okamihoch alebo pri použití viacerých snímačov, dosiahnuteľná koregistrácia je menšia ako 0,2 pixla. Spracovanie je opäť zamerané na výrez v oblasti Moravskoslezského kraja, ktorý je definovaný súradnicami stredu snímku a počtom riadkov a stĺpcov (49°49'34.881"N, 18°17'17.436"E, 300:300). Koregistrácia obrazov sa vykonáva v troch krokoch.

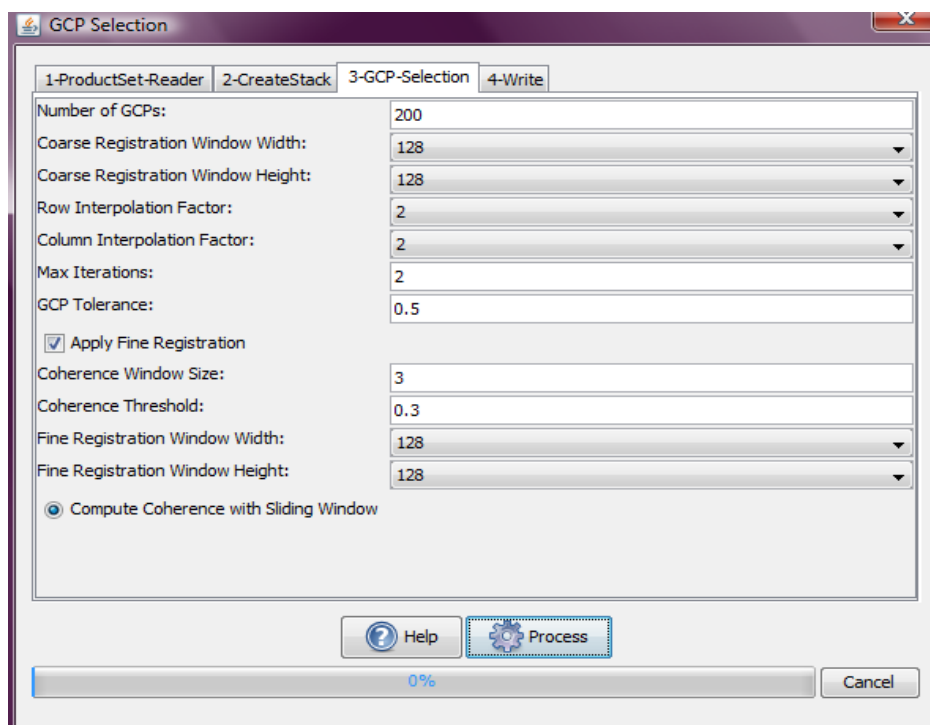
Najskôr je nutné vytvoriť zásobník (Create Stack), znázornené na *Obr. 53. Tvorba zásobníka (stack) pre ďalšie spracovanie*. Tento operátor umožňuje uložiť dva priestorovo sa prekrywajúce produkty, čo znamená, že pixel hodnôt jedného produktu (slave) je prevzorkovaný do geografického rastra druhého produktu (master). Pri prevzorkovaní sa využíva geografická pozícia master rastra na nájdenie odpovedajúcich bodov v slave rastri. Ak v master snímku nie je žiadna vzorka s geografickou polohou, master snímok je nastavený na hodnotu NoData.



Obr. 53. Tvorba zásobníka (stack) pre ďalšie spracovanie

Po vytvorení zásobníka (stack) sa definuje sada rovnomerne rozložených GCP bodov (GCP – Ground Control Points) na master snímku, pričom odpovedajúce GCP body na slave snímku sú vypočítavané (viď Obr. 54. Nastavenie parametrov pre výber vlicovacích bodov). Pre výber vlicovacích bodov sa nastavujú nasledujúce parametre:

1. Celkový počet vlicovacích bodov pre koregistráciu
2. Šírka a výška okna hrubej koregistrácie
3. Faktor interpolácie pre riadok a stĺpec
4. Maximálny počet iterácií pre výpočet hrubej koregistrácie GCP bodov slave snímku
5. Tolerancia GCP bodov
6. Veľkosť okna koherencie a jej odhad
7. Šírka a výška okna pre jemnú koregistráciu



Obr. 54. Nastavenie parametrov pre výber vlicovacích bodov

Tretím krokom koregistrácie je výpočet „warp“ funkcie. Funkcia mapuje vlicovacie body master snímku na slave snímok pomocou metódy najmenších štvorcov, uvádza [41]. Pri výpočte je nutné stanoviť počet iterácií, pretože prvý výpočet môže obsahovať chyby na vlicovacích bodoch. Prvá funkcia je vypočítaná pomocou pôvodných GCP párov. Potom vlicovacie body master snímku sú mapované na slave snímok pomocou funkcie warp a vypočítavajú sa reziduá medzi master vlicovacími bodmi a im korešpondujúcimi slave vlicovacími bodmi. Vypočítavajú sa tiež smerodajné odchýlky a priemerné RMS chyby, ktorými sú GCP páry filtrované. GCP páry s RMS vyššou ako priemerná RMS sú eliminované a odstránené. Súčasťou procesu je aj vytvorenie súboru reziduí. Je to textový súbor obsahujúci informácie o vlicovacích bodoch pre master a slave snímok pred a po každom odstránení. (viď Príloha č.7.)

Po dokončení koregistrácie slave snímky na master snímku musia byť koregistrované obrazy rádiometricky skalibrované. Cieľom kalibrácie je poskytnúť snímky, v ktorých hodnoty pixelov priamo súvisia so spätným rozptylom scény. Účelom rádiometrickej korekcie (kalibrácie) je vytvoriť nejakú výstupnú hodnotu DN (Digital Number), ktorá normalizuje odozvu každého jednotlivého detektora do nejakej spoločnej stupnice rozsahu žiarenia, uvádza [46] . Inak povedané ide o normalizáciu snímkov na rovnakú úroveň. Hoci nekalibrovaný snímok je pre kvalitatívne použitie dostatočný, ale kalibrovaný SAR snímok je

zásadný pre kvantitatívne využitie dát, uvádza [25]. Pri typickom spracovaní dát nedochádza k rádiometrickým korekciám a toto rádiometrické skreslenie na snímkoch zostáva. Preto je nutné použiť rádiometrickú korekciu na SAR snímky, a to tak, že hodnota pixelu SAR snímky skutočne reprezentuje spätný rozptyl odrazivosti povrchu. Rádiometrická korekcia je potrebná aj pri porovnávaní rôznych SAR snímok získaných rôznymi senzormi alebo pri porovnávaní snímok získaných rovnakými senzormi, ale v rôznom čase alebo aj pri získavaní v rôznych režimoch. Pri kalibrácii snímok družíc ERS-1 a ERS-2 sa opravuje:

- uhol sklonu
- kalibračná konštanta
- výška antény

Prevedenie rádiometrických korekcií býva často prezentované ako jeden zo základných pedspracovateľských krokov pri práci s družicovými dátami.

Po vykonaní úplnej koregistrácie a rádiometrickej korekcii všetkých snímok v zásobníku (stack) bolo prevedené porovnávanie amplitúdy jednotlivých radarových obrazov, aby bolo možné zistiť aké hodnoty odrazivosti vykazujú jednotlivé pixely vo vybraných oblastiach.

Presné informácie o pozícii poskytujú aj vlicovacie body (GCP). Preto, aby bola prevedená presná lokalizácia vybraných oblastí, je potrebné definovať vlicovacie body podľa GPS súradníc jednotlivých miest. Tie prispôbia slave snímok k master snímku tak, aby každý pixel slave snímku predstavoval rovnaký bod na povrchu Zeme odpovedajúci pixelu na master snímku.

Program umožňuje zadať a vytvoriť pravidelnú sieť (grid) týchto bodov podľa zadania ich počtu. Výber vlicovacích bodov je zameraný len na tie najvýznamnejšie body, ktoré sú v referenčnej mape a v mape koherencie podozrivé zo zmeny. Prehľad vlicovacích bodov znázorňujú nasledujúce tabuľky.

Tabuľka č. 4.: Lokalizácia GPS vybraných oblastí
a ich amplitúda pre pár z 19.2.1996 a 29.4.1996

Oblasť	Lokalizácia		GCP bod	Názov GCP bodu	Amplitúda [dB]
	Latitude	Longitude			
Ostrava Nová Ves	18.135243	49.490769	GCP_1	Ostrava_Nova_Ves	19.1574
Ostrava Přívoz	18.148066	49.51002	GCP_2	Ostrava_Privoz	14.9338
Ostrava Zábřeh	18.1324548	49.4813852	GCP_3	Ostrava_Zabreh	17.7382
Opava	17.5435743	49.5622469	GCP_4	Opava	14.8094
Karviná Darkov	18.33282	49.5027801	GCP_5	Karvina	20.5350
Ostrava Svinov	18.1231628	49.4849006	GCP_6	Svinov	12.5793
Ostrava Výškovice	18.1119921	49.4652835	GCP_7	Vyskovice	21.5246
Polanka	18.1132139	49.4543058	GCP_8	Polanka	16.9019
Albrechtický	18.544043	49.4233004	GCP_9	Albrechticky	18.9213
Studénka	18.332269	49.4156088	GCP_10	Studenka	21.4493

Tabuľka č. 5.: Lokalizácia GPS vybraných oblastí
a ich amplitúda pre pár z 28.8.1997 a 10.11.1997

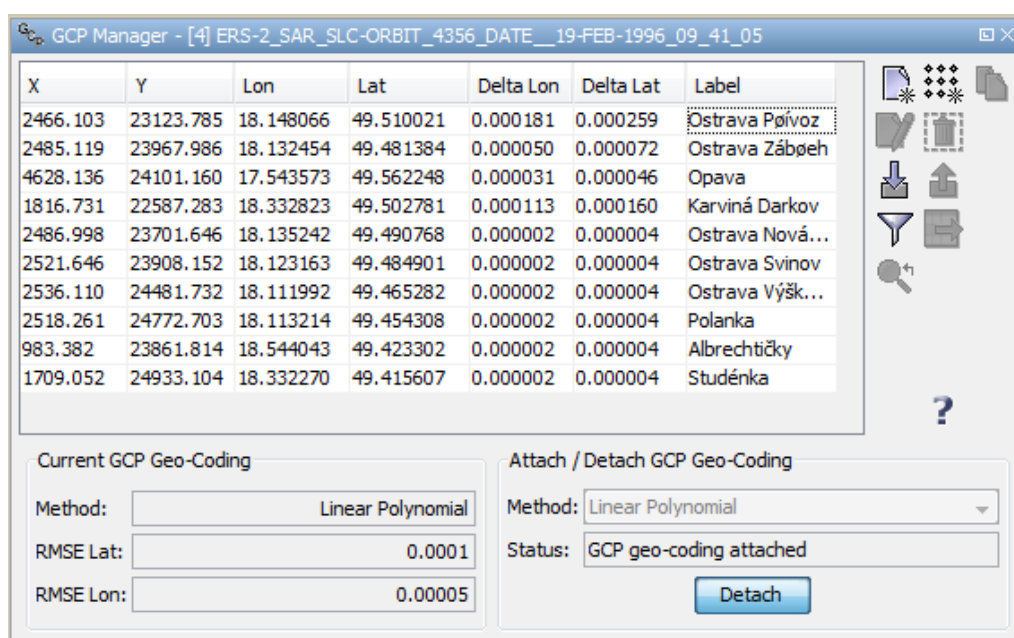
Oblasť	Lokalizácia		GCP bod	Názov GCP bodu	Amplitúda [dB]
	Latitude	Longitude			
Ostrava Nová Ves	18.135243	49.490769	GCP_1	Ostrava_Nova_Ves	18.3349
Ostrava Přívoz	18.148066	49.51002	GCP_2	Ostrava_Privoz	21.9398
Ostrava Zábřeh	18.1324548	49.4813852	GCP_3	Ostrava_Zabreh	19.4000
Opava	17.5435743	49.5622469	GCP_4	Opava	14.8094
Karviná Darkov	18.33282	49.5027801	GCP_5	Karvina	18.4286
Ostrava Svinov	18.1231628	49.4849006	GCP_6	Svinov	25.2634
Ostrava Výškovice	18.1119921	49.4652835	GCP_7	Vyskovice	19.7248
Polanka	18.1132139	49.4543058	GCP_8	Polanka	20.3277
Albrechtický	18.544043	49.4233004	GCP_9	Albrechticky	13.6539
Studénka	18.332269	49.4156088	GCP_10	Studenka	18.1291

Tabuľka č. 6.: Lokalizácia GPS vybraných oblastí
a ich amplitúda pre pár z 4.5.1998 a 8.6.1998

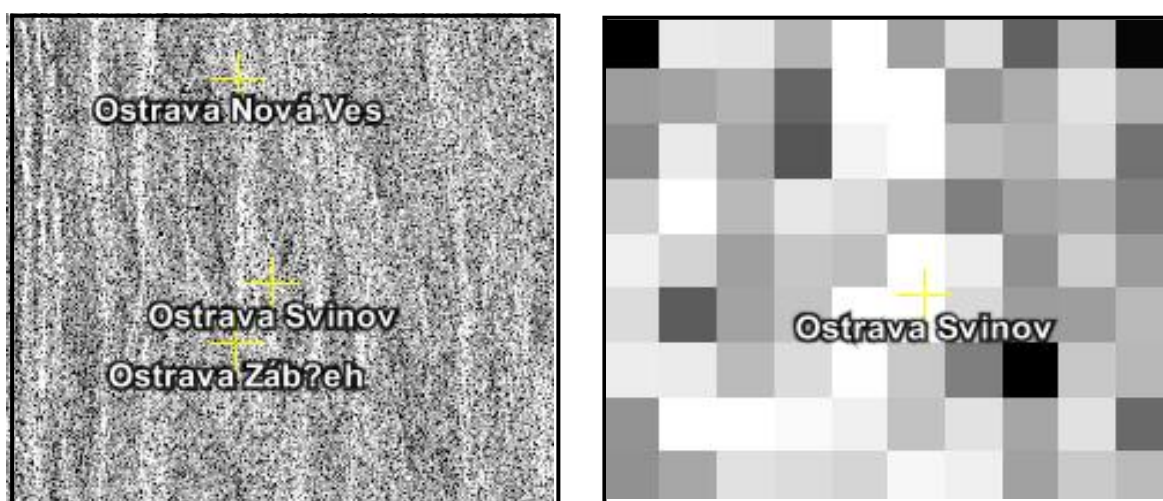
Oblasť	Lokalizácia		GCP bod	Názov GCP bodu	Amplitúda [dB]
	Latitude	Longitude			
Ostrava Nová Ves	18.135243	49.490769	GCP_1	Ostrava_Nova_Ves	21.6044
Ostrava Přívoz	18.148066	49.51002	GCP_2	Ostrava_Privoz	21.6316
Ostrava Zábřeh	18.1324548	49.4813852	GCP_3	Ostrava_Zabreh	21.2355
Opava	17.5435743	49.5622469	GCP_4	Opava	14.8094
Karviná Darkov	18.33282	49.5027801	GCP_5	Karvina	13.1824
Ostrava Svinov	18.1231628	49.4849006	GCP_6	Svinov	17.8678
Ostrava Výškovice	18.1119921	49.4652835	GCP_7	Vyskovice	17.4122
Polanka	18.1132139	49.4543058	GCP_8	Polanka	17.5379
Albrechtický	18.544043	49.4233004	GCP_9	Albrechticky	15.1265
Studénka	18.332269	49.4156088	GCP_10	Studenka	15.7213

Tieto vlicovacie body sú definované pomocou funkcie GCP Manager v programe NEST Software. Funkcia vyžaduje zadanie presných súradníc vybraného bodu oblasti, názov a popis vlicovacieho bodu, ako znázorňuje *Obr. 55. Definovanie vlicovacích bodov*. Program poskytuje aj možnosť uloženia definovaných vlicovacích bodov do súboru a tým je možné ich využiť aj pri ďalšom spracovaní.

Keď je bod definovaný pomocou presných súradníc, dochádza k jeho pripojeniu na snímok. Keďže pracujeme v zásobníku (stack) s viacerými snímkami, je táto funkcia veľmi výhodná. Pri otvorení akéhokoľvek snímku v zásobníku sa tieto GCP body zobrazia presne podľa definovaných súradníc v snímku.



Obr. 55. Definovanie vlicovacích bodov



Obr. 56. Stanovenie hodnoty amplitúdy

Vlicovacie body pripojené na snímok poskytujú teraz presné informácie o amplitúde daného bodu. Tento bod je pripojený na konkrétny pixel, čiže ide o amplitúdu daného pixelu ako znázorňuje Obr. 56. Stanovenie hodnoty amplitúdy. Najväčšej hodnote amplitúdy odpovedá biela farba, najnižšej hodnote čierna farba. Po porovnaní predchádzajúcich tabuliek môžeme konštatovať, že najväčšiu odrazivosť povrchu vykazujú snímky z roku 1996 a 1998.

Ak porovnáme napríklad amplitúdu vlicovacieho bodu Ostrava Nová Ves, tak zistíme, že amplitúda snímku z roku 1996 bola 19.1574 dB, v roku 1997 bola amplitúda 18.3349 dB a v roku 1998 sa bola na hodnote 21.6044 dB. Z toho vyplýva, že odrazivosť sa v roku 1997 mierne znížila, čo môže byť spôsobené prítomnosťou vody v danom mieste. Ide o bod presne definovaný súradnicami, takže by nemalo dôjsť k nesprávnej lokalizácii miesta. Bod je pripojený na konkrétny pixel v snímku a preto hodnota amplitúdy odpovedá vždy tomu istému pixelu na snímku. Rovnakým spôsobom sú stanovené hodnoty amplitúdy pre všetky vybrané vlicovacie body, ich hodnoty sú definované v predchádzajúcich tabuľkách.

Na základe amplitúdy snímkov dochádzame k záveru, že najnižšiu odrazivosť povrchu poskytujú snímky z roku 1997 a tým môžem potvrdiť, že v tomto roku skutočne zmenil typ povrchu terénu vo vybraných lokalitách. Povrch mohol byť zanesený nánosmi a bahnom, v dôsledku čoho sa zmenila aj odrazivosť. Snímok sa viaže k dátumu 28.8.1997, čo je pár dní po bleskových povodniach a predpokladá sa, že na povrchu vybraných lokalít sa stále vyskytovala súvislá hladina nánosov.

11. INTEGRÁCIA VÝSLEDKOV DO GIS

Doteraz som sa v projekte zaoberala vyhodnotením radarových dát metódou radarovej interferometrie. Táto metóda spočíva v súčasnom vyhodnovení väčšieho počtu snímkov, v tzv. stacku, ktorý označuje viacero snímkov daného územia. Konkrétny počet snímkov, s ktorými som pracovala, bol 12 snímkov. Z týchto 12 snímkov som vyhodnocovala jeden snímok pre každý rok, čiže 3 finálne interferogramy. Interpretáciou interferogramov som sa zaoberala v predchádzajúcich kapitolách. Vyhodnocovala som potenciálne nestabilné územia po povodňovej aktivite s najväčšou koherenciou. S ohľadom na náročnosť interferometrických výpočtov som vyhodnotenie obmedzila na miesta s najväčšou koherenciou. Z vyhodnotenia interferometrických produktov som získala binárne dáta jednotlivých snímkov. Ich formát neumožňuje prácu v textovom režime. Výstupné súbory vyhodnotenia sú binárne súbory typu float, tj. s pohyblivou čiarkou. Na každú číslicu pripadajú 4 byty informácie. Súbory interferometrických produktov som ukladala do jednej zložky a tak som si zabezpečila jednoduchý prístup k interferogramom.

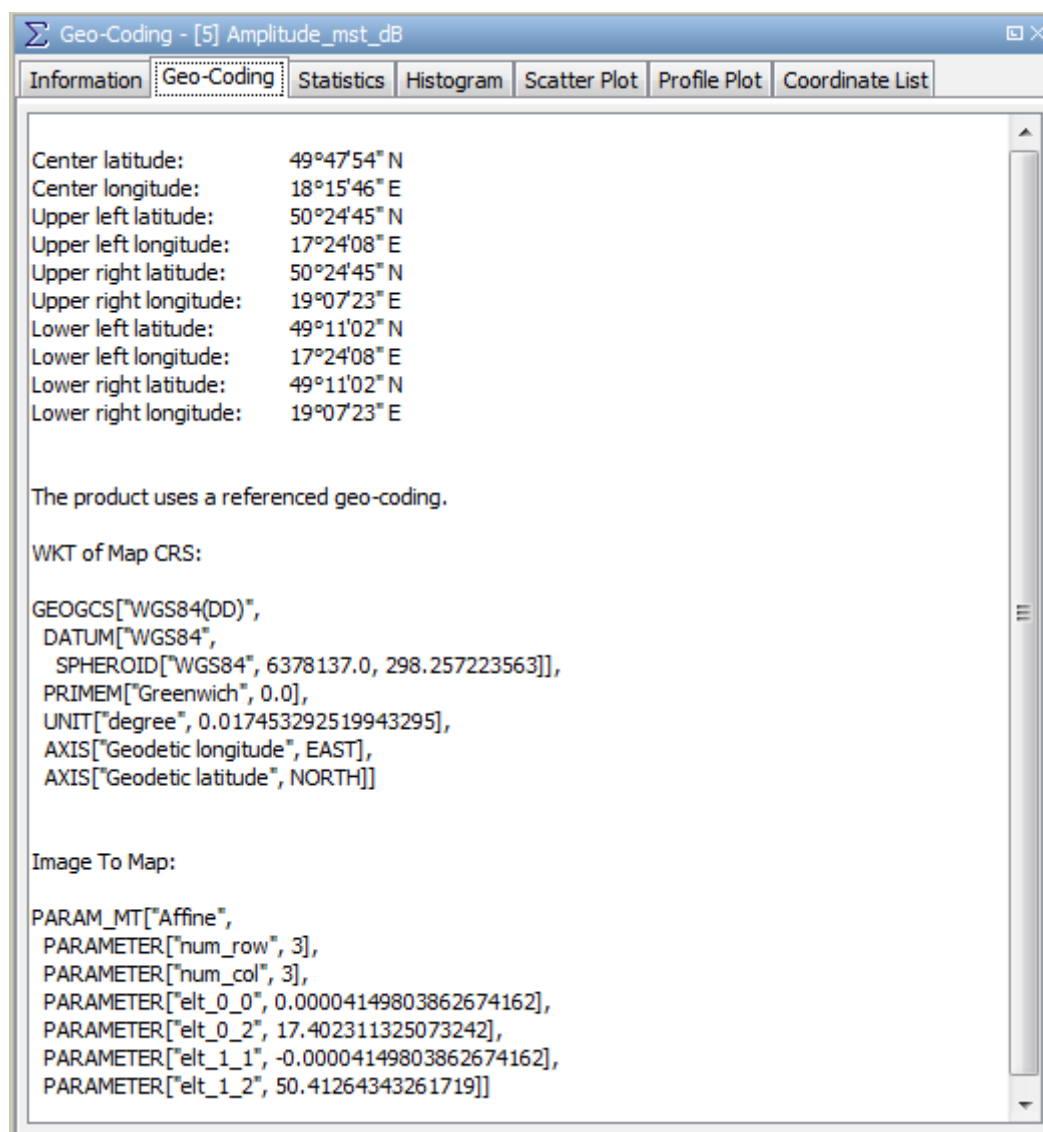
Spracovanie výsledných interferogramov prebiehalo opäť v programe NEST Software. Integrácii interferogramov do geografického informačného systému predchádzalo ich spracovanie v programe. Po vytvorení stacku, úplnej koregidtrácii a kalibrácii dát som vybrané interferogramy previedla do súradnicového systému. Keďže zdrojové radarové dáta sú uložené v systéme WGS-84 (viď *Obr. 57. Informácie o geokódovanom obraze*), použila som rovnaký súradnicový systém. K prevedeniu kroku som použila nástroj „*Reprojection*“.

Reprojekcia je prevedenie obrazových dát medzi rôznymi mapovými zobrazeniami (definovanými na rôznych elipsoidoch v rôznych súradnicových systémoch). Je to pomerne častý typ spracovania, vyvolaný potrebou kombinácie dát z rôznych zdrojov.

K základným parametrom nastavenia reprojekcie patrí voľba súradnicového systému, kde môžem nastaviť aj geodetický dátum a transformačné parametre. Ďalej som nastavila zachovanie rozlíšenia a určila som, aby sa transformovali aj vlicovacie body.

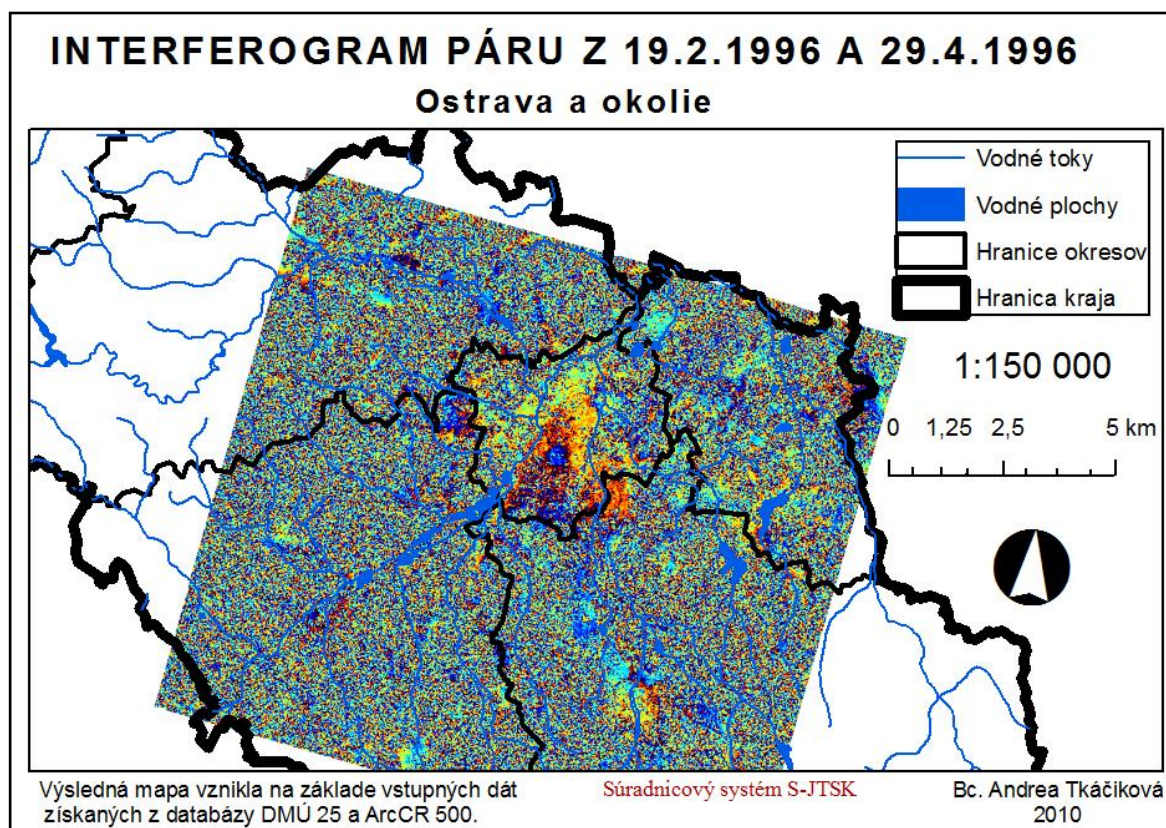
Výstupom reprojekcie je produkt, ktorý je možné uložiť v rôznych formátoch. Z prednastavených formátov ako je BEAM-DIMAP, GeoTIFF alebo HDF5. Ja som zvolila formát GeoTIFF, ktorý je podporovaný produktom ArcInfo.

Práve produkt ArcInfo, konkrétne ArcMap som použila na konečnú vizualizáciu vytvorených produktov. Viac o produkte v kapitole *13.6 ArcGIS Software*.



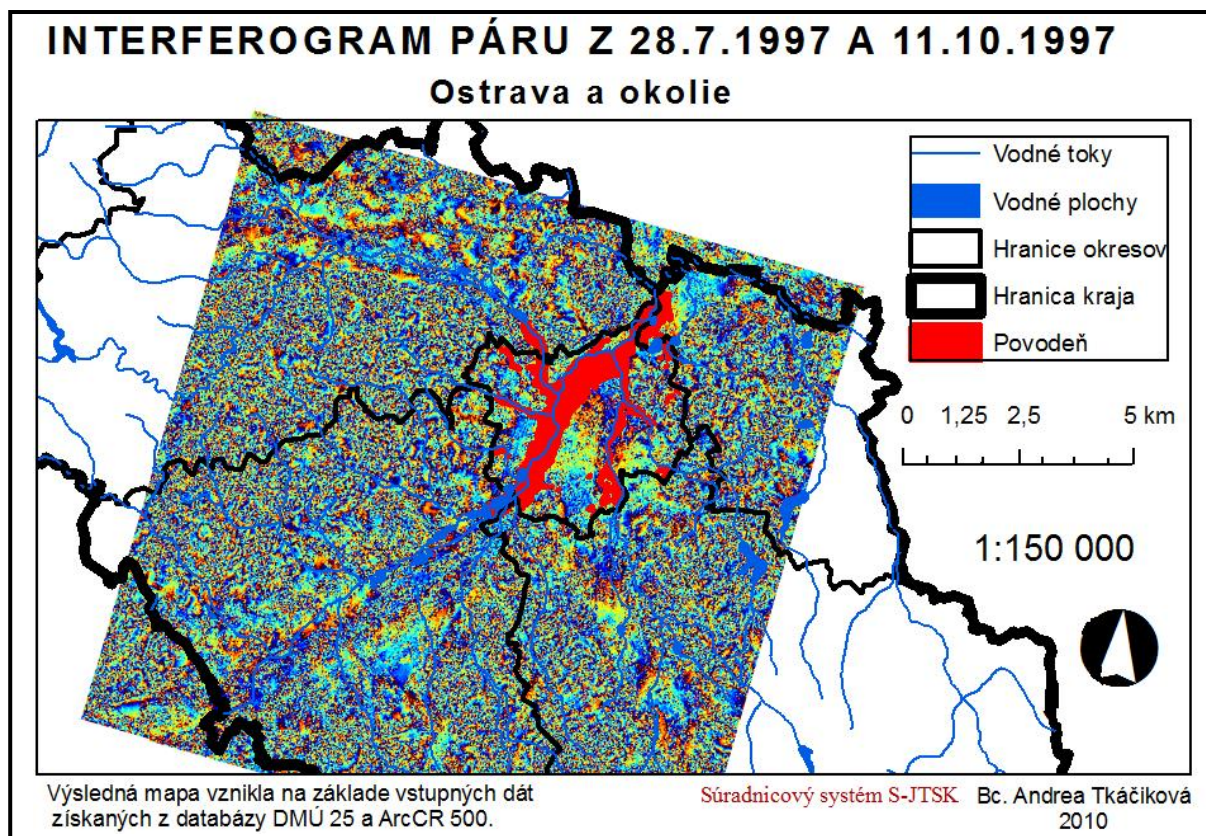
Obr. 57. Informácie o geokódovanom obraze

Výsledný produkt je znázornený na Obr. 58. Interferogram páru 19.2. a 29.4. 1996 situovaný v mape. Interferometrické prúžky sa v interferograme vyskytujú, aj napriek tomu, že v roku 1996 bola táto oblasť vzhľadom k povodňovej aktivite pokojná. Farebné fľaky v interferograme sa sústreďujú v okolí miest, čo je spôsobené prevažne mestskou zástavbou a najmä tým, že časová základňa medzi snímkami je 69 dní. Tento časový odstup medzi snímkami môže spôsobiť určitý posun, čo sa prejaví ako farebná škvrna.

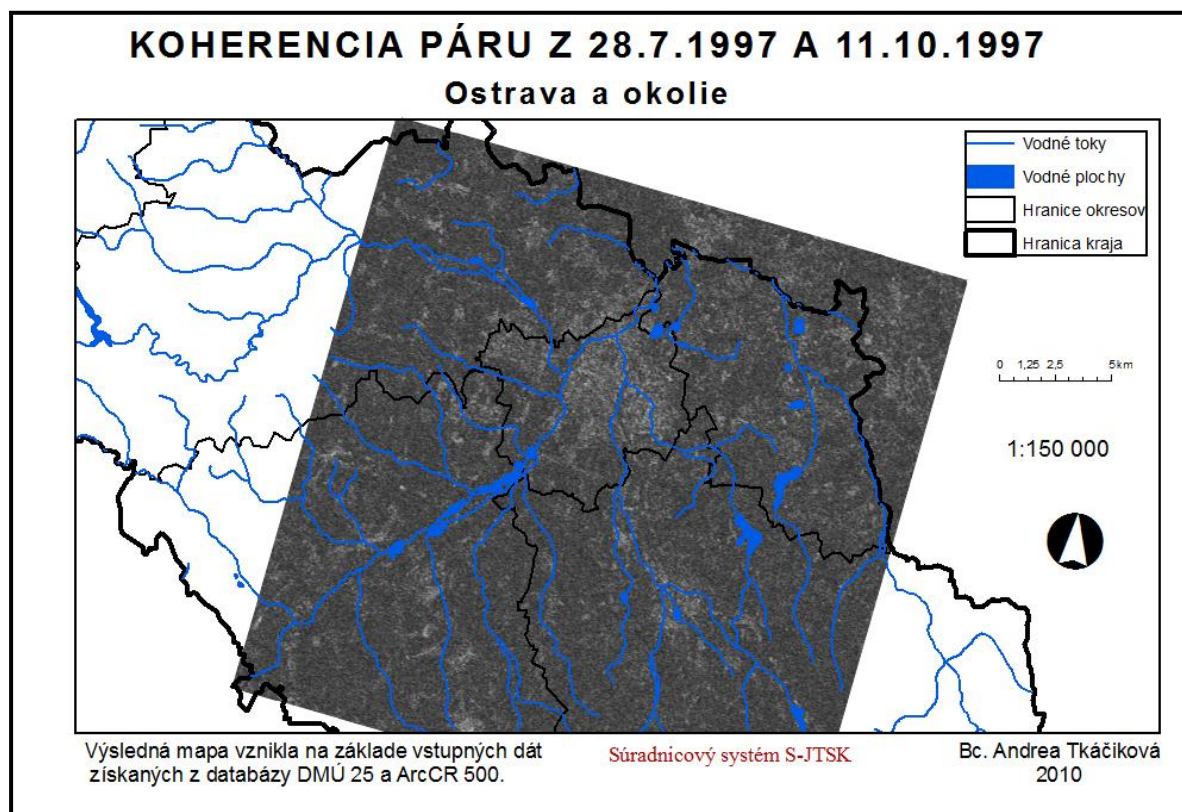


Obr. 58. Interferogram páru 19.2. a 29.4. 1996 situovaný v mape.

Rozdielna situácia sa vyskytla v roku 1997 (Obr. 59. Interferogram páru 28.7. a 11.10. 1997 situovaný v mape). Interferogram je bohatší na interferometrické prúžky a to nie len v oblasti miest, ale môžeme vidieť, že prúžky sa tiahnu aj povodím riek. Čo sa týka oblasti Ostravy a konkrétne povodia rieky Odry je intenzita interferometrických prúžkov silnejšia. Tento fakt potvrdzuje aj rozsah povodní v okolí rieky Odry v Ostrave, ktoré sú v mape znázornené červeným polygónom. Ide o vektorové dáta, ktoré mapujú rozsah povodní v okolí Ostravy. Vektorové dáta pre spracovanie poskytol Magistrát mesta Ostravy.



Obr. 59. Interferogram páru 28.8. a 10.11. 1997 situovaný v mape



Obr. 60. Koherencia interferogramu páru z 28.7. a 11.10.1997

12. POUŽITÉ SOFTWARE NÁSTROJE

Spracovanie dát prebiehalo v open – source nástroji DORIS Software 4.1.0, ktorý je určený práve na spracovanie radarových snímok. Nástroj beží len pod OS Linux. Na spracovanie dát som použila aj iné voľne dostupné softwarové nástroje ako sú DESCW Software, NEST Software a Google Earth.

12.1 DORIS Software

DORIS - Delft Object-oriented Radar Interferometric Software [28] - je samostatný program, ktorý dokáže vykonávať najbežnejšie kroky interferometrického spracovania, ktoré sú rozdelené do modulov. Ide o software vyvíjaný na univerzitnej a vedeckej pôde pod GPU licenciou (*General Public License*). Pôvodný zámer bolo vytvoriť software na vyhodnotenie limit v oblasti merania deformácií, merania vplyvu atmosféry a prenášania chýb. Centrom výskumu je DEOS (*Delft Institute for Earth-oriented Space research*) v Holandskom Delfte. Platforma je ako pre väčšinu voľných softvérov HP-Unix, ale je kompilovateľná na všetkých platformách. Má modulárnu štruktúru, programovaný v C++ jazyku, stavaný na celé interferometrické spracovanie (ale len pre SLC dáta), nenáročný na diskový priestor a pamäť, [36]. Pretože ide o otvorený systém, a je možné ho kombinovať s inými algoritmami získanými z iných zdrojov. Doris dokáže spracovávať SLC (Single Look Complex) dáta k vytvoreniu interferometrických produktov a tiež dokáže georeferencovať rozbalené interferogramy. Najvhodnejší je na spracovanie dát z družíc ERS-1, ERS-2 a ENVISAT, pretože tieto platformy sú stabilné, majú k dispozícii veľmi presné informácie o orbitách a ich dáta sú pomerne lacné. Doris je schopný čítať aj formát dát z družíc JERS a RADARSAT. Dokonca aj v prípade, že SLC dáta boli vytvorené nejakým iným SAR procesorom, je možné program Doris použiť na interferometrické spracovanie [28].

Základné charakteristiky Dorisu:

- je objektovo-orientovaný software, dobre čitateľný
- má modulárnu štruktúru, ktorá umožňuje ľahko vybrať vhodný algoritmus pre konkrétnu aplikáciu a pridávať nové algoritmy
- je dobre zdokumentovaný (užívateľské príručky, technická dokumentácia, štruktúrny spôsob komentovania zdroja)
- je nezávislý na platforme, kompilátore a neštandardných knižniciach, čo znamená, že má prenosný kód. Použitie HP Lapack a VecLib knižnice je nepovinné

- má nízke systémové požiadavky (minimálne asi 16MB RAM a 2GB voľného miesta na pevnom disku)
- spracovanie riadi malý vstupný súbor a tri výstupné súbory, ktoré obsahujú výsledky, jeden pre master image, jeden pre slave image a jeden pre interferogram

12.2 DESCW Software

DESCW (Display Earth remote sensing Swath Coverage for Windows) je podľa [27] a [35] multifunkčný softwarový nástroj, ktorý umožňuje zobrazovať radarové dáta z rôznych družíc (ERS-1, ERS-2, LANDSAT-5, LANDSAT-7, JERS-1, TERRA/MODIS a ENVISAT). Pomáha pri výbere a usporiadaní radarových snímok z viacerých misií do jednej. Umožňuje výber záujmovej oblasti pomocou nástrojov na výber oblasti (*area search tool*), ktoré sa aktivujú po výbere oblasti myšou.

12.3 SNAPHU

SNAPHU (Statistical-cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping) je voľne dostupným softwarom pre rozbalenie fázy. Tento program je založený na použití informácií o intenzite zaznamenaného signálu pre identifikáciu pravdepodobnej prítomnosti prekryvu alebo zhustenia signálu spôsobené topografiou (teda väčším sklonom), uvádza [1]. Vstupnými dátovými súbormi sú súbor zabalenej fázy, koherenčný súbor a súbor s intenzitou. Pri použití programu DORIS pre interferometrické spracovanie je pri kroku rozbalenia fázy volaný program SNAPHU, ktorý vypočíta hodnoty rozbalenej fázy a vráti ich programu DORIS pre pokračovanie procesu spracovania.

12.4 Google Earth

Google Earth ako produkt má niekoľko softwarových variant. Google [31] ponúka na stiahnutie voľnú verziu i ďalšie platené verzie s funkciami navyše (ako napr. zobrazenie cesty podľa údajov z GPS). Okrem geografického zobrazenia môže zobrazovať názvy štátov, regiónov, obcí či dôležitých komunikácií. Ako voliteľnú možnosť tiež ponúka definovanie vrstiev, ktoré tvoria body na zemskom povrchu, ktoré majú spoločnú určitú tému. Umožňuje prehliadať obraz svojho domu, školy, kancelárie alebo ktoréhokolvek miesta na Zemi, vyhľadať trasu jazdy z jedného miesta na iné a preletieť sa po nej ako aj zobrazenie trojrozmerného terénu.

12.5 NEST Software

NEST Software (Next ESA SAR Toolbox) je podľa [7] programový balík s integrovaným prehliadačom, ktorý je určený na načítavanie, kalibráciu, následné spracovanie a analýzu SAR dát agentúry ESA, získaných metódou trojbletovej diferenčnej interferometrie. Je distribuovaný ako open-source nástroj, ktorý užívateľom umožňuje ľahko vyvíjať nové post-procesory pre SAR dáta pomocou Java Application Programming Interface (API). NEST je vyvinutý spoločnosťou Array Systems Computing Inc, [41]. V spolupráci s agentúrou ESA. NEST Software zahŕňa nasledujúce funkcie:

- Display and Analysis Tool (DAT) - vizualizácia, analýza a spracovanie dát
- Graph Processing Tool (GPT) – spracovanie reťazcov v príkazovom riadku
- Konverzia dát do COTS formátov pre použitie v inom software
- Tvorba a spracovanie grafov
- Načítavanie, zobrazenie a kalibrácia ENVISAT, ASAR, ERS-1 ERS-2 dát
- Tvorba štatistík, koregistrácia, konverzia Slant Range na Ground Range

12.6 ArcGIS Software

ArcGIS poskytuje škálovateľný rámec implementácii Geografického Informačného Systému pre jednoduchého užívateľa alebo mnohých používateľov desktopov, serverov, webových aplikácií v tejto oblasti. Podľa [30] je ArcGIS integrovaný systém GIS softvérových produktov pre stavbu kompletného GISu. Skladá sa zo štyroch základných rámcov pre nasadenie GIS:

1. ArcGIS Desktop - integrovaná sada profesionálnych GIS aplikácií. Väčšina užívateľov ich pozná ako tieto tri produkty: ArcView, ArcEditor, ArcInfo
2. Server GIS - ArcIMS, ArcGIS Server, a ArcGIS Image Server
3. Mobilný GIS - ArcPad a ArcGIS Mobile na poli výpočtovej techniky
4. ESRI Developer Network (EDN) - softvérové komponenty pre vývojárov na rozšírenie GIS desktopov, na budovanie vlastných GIS aplikácií, pridávanie vlastných GIS služieb a webových aplikácií a pre vytváranie mobilných riešení.

13. ZÁVERY SPRACOVANIA

Cieľom práce bolo zistiť zmeny v teréne po povodniach, ktoré sa udiali v júli 1997. Práca obsahuje ucelený prehľad teoretických základov problematiky družicovej radarovej interferometrie spolu s uvedením praktických postupov riešenia problematiky výpočtu a analýzy interferogramov počínajúc voľbou vhodných radarových snímok, cez ich spracovanie až po vlastnú interpretáciu výsledkov. Poznatky uvedené v tejto práci môžu pomôcť pri riešení otázok spojených s aplikáciou tejto metódy v praxi a vyvarovať sa potenciálnym úskaliam, ktoré môže táto metóda zahrňovať.

Rešeršná časť spracovania práce prebehla bez významnejších problémov. Bol spracovaný prehľad metód a aplikácii radarovej interferometrie a využitie tejto metódy. Analytická časť práce zahrňovala výber vhodných snímok pre spracovanie. Veľká časť praktickej práce zahrňovala pedspracovanie a samotné spracovanie dát. Pedspracovanie a spracovanie dát som previedla v programových produktoch DORIS Software 4.2 a NEST DAT 3C 1.01, no finálne spracovanie a tvorba výstupov prebehlo v produkte ArcMap 9.2.

Výsledky pozemných meraní boli predpokladané na základe porovnávania interferometrických výsledkov. Preto bol výber dát vykonaný s ohľadom na túto skutočnosť. Oblasť záujmu bola z väčšej časti v dekorelovanom interferograme, čo znamená, že povrch sa zmenil takým spôsobom, že schopnosť interferencie signálu zmizla. To môže byť spôsobené dvoma najvýznamnejšími faktormi a to zmenou povrchovej vlhkosti a tvaru povrchu (napr. topenie snehu alebo zmena trávnatého povrchu v oblasti) alebo sa povrch pohyboval približne vodorovne v smere azimutu. Topografia regiónu a pozemné merania naznačujú, že zmeny povrchu v tejto záujmovej oblasti sa objavujú väčšinou v smere sever - juh. Bohužiaľ, tento smer je približne rovnobežný s dráhou družice, čo spôsobuje, že zmeny povrchu sú veľmi ťažko merateľné SAR interferometriou.

Napriek tomu projekt ukázal, že využitie radarovej interferometrie je možné použiť pri vyhodnocovaní zmien terénu po povodniach v Moravskoslezskom kraji. Aj keď výsledky nie sú príliš povzbudzujúce, projekt ukázal, že je možné sledovať aj menšie nánosy pôdy, napriek tomu, že tu dochádza k dekorelácii, ktorú snímky spôsobujú. Dekorelácia sa tu zhoršila tým, že došlo k nánosom pôdy a blata v smere blízkom k smeru letu družice.

Myslím, že publikované metódy a výsledky interferometrického spracovania napĺňajú základné teoretické a praktické ciele práce a práca bude prínosom pre ďalšie využitie radarovej interferometrie.

14. SUMMARY

The objective the diploma thesis was to using radar interferometry for terrain change detection after floods in 1997. The work contains a comprehensive overview of the theoretical foundations of the issue of satellite radar interferometry, together with the practical procedures of solution with the calculation and analysis of interferograms from choice of radar images, processing them to own interpretation of results. The knowledge in this work may help by resolution the issues associated with the application of this method in practice and to avoid potential uncertainties, which may include this method.

The exploration of background research raced through without any serious complication. It was processed an overview of the application of radar interferometry and to use of this method. The analytical work includes the selection of suitable images for processing. The practical work includes pre-processing and processing of data. I transferred preprocessing and data processing in the software products DORIS 4.2 and NEST DAT 3C 1.0, but the final processing and production of outputs took place in software ArcMap 9.2.

The results of ground measurements were estimated by comparison interferometric results. Therefore, the selection of data made with regard to this fact. The area of interest was largely in decorrelated interferogram, which means that the surface was changed, the ability of signal interference has disappeared. This may be due to two major factors: with the change of surface moisture and surface shape or surface fluctuated between roughly horizontally in the azimuth direction. The topography of the region and ground measurement indicate that the surface changes in the area of interest occurs mostly in the north – south direction. Unfortunately, this direction is approximately parallel to the satellites track, which makes that the surface changes are very difficult measurable SAR interferometry.

Nevertheless, the project showed that the use of radar interferometry can be use in the evaluation of terrain after floods in Moravia – Silesia region. Although the results are very encouraging, the project showed that it is possible to observe smaller silt soil, although there is a decorrelation that images cause. Decorrelation here worsened by the fact that there was a layer of soil and mud in the direction of flight segment.

I think that the published methods and results of the interferometry processing fulfill the basic theoretical and practical objectives of the work and the work will be beneficial for other uses radar interferometry.

15. POUŽITÁ LITERATÚRA A ZDROJE

Publikácie:

- [1] Čapková I., Radarová interferometrie: chyby v georeferencovaní, Aktuální problém fotogrammetrie a DPZ, Praha, 2005
- [2] Čapková, I., Satellite orbit errors and their influence on interferograms, Diplomová práce, 2005
- [3] Dobrovolný P., Dálkový průzkum Země: Digitální zpracování obrazu, Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Brno 1998, 207 str. ISBN 80-210-1812-7
- [4] Educational Resources for Radar Remote Sensing, GlobeSAR Program Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resources Canada, Dostupný z WWW:
http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/programs/globsar/gsarmain_e.html
- [5] Eoportal directory: ERS-2 [online]. 2008 [cit. 2008-05-20]. Dostupný z WWW:
<http://directory.eoportal.org/>
- [6] ESA - informácie o družiciach: <http://orbits.esa.int/orbits/eo/satellite/satellite.htm>.
- [7] European Space Agency missions - ERS [online]. 2008 [cit. 2008-05-20]. Dostupný z WWW: <http://earth.esa.int/ers/>
- [8] Girmala M., Metódy posúdenia kvality interferogramu, Diplomová práca, Praha, 2006
- [9] Halounová L., Radarová analýza, Prezentácia, Praha, 2005
- [10] Halounová L., Pavelka K., Dálkový průzkum Země, ČVUT Praha, 2005, 192 s., ISBN 80-01-03124-1
- [11] Hanssen, R. F.: Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2001
- [12] Hlaváčová, I., Interferometric stacks in partially coherent areas, PhD Thesis, ČVUT, Praha, 2008
- [13] Chuwa, L.: Vyhodnocení chyb v začátku měření radarových dat pro interferometrii, Diplomová práce, ČVUT, Praha, 2006.
- [14] Introduction to INSAR, Charles University in Prague, Rocca, 27 - 31 October 2008, DAGC

- [15] KAMPES, B.: Delft Object-oriented Radar Interferometric Software, User's manual and technical documentation, Version: v4.02, Delft Institute of Earth Observation and Space Systems (DEOS), Delft University of Technology. Dostupný z WWW:
<http://enterprise.lr.tudelft.nl/doris/usermanual/>
- [16] Kampes B.M., Hanssen R.F., Marinkovic P., Radar Interferometric processing with the Doris software, The Cookbook, , Training course ESA – MONRE/RSC, Hanoi, Vietnam, 25 Feb.–7 Mar. 2008
- [17] Kianička J., Radar Interferometry used for detection of landslides and subsidences in the Northern Bohemia Brown Coal Basin, Laboratory of Remote Sensing, Department of Mapping and Cartography, Prague, Faculty of Civil Engineering Czech Republic, 2005
- [18] Kianička J., SAR Interferometry - new trend in remote sensing (SAR Interferometria – nový trend v diaľkovom prieskume Zeme), Katedra kartografie a mapování ČVUT – Stavební fakulta, Praha
- [19] Knechtlová B., DMT z interferometrického vyhodnocení, Teoretické aspekty geodézie a kartografie, Juniorstav 2008
- [20] Mnichovský, P.: Vyhodnocení území podezřelých z poklesů určených metodou interferometrie, Diploma Thesis, December 2005
- [21] Urban Petr, Detekce polohových změn zemského povrchu radarovou interferometrií, Disertační práce k získání akademického titulu Ph.D., Praha, 2005
- [22] Publication: InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, February 2007
- [23] Prati C., Introduction to INSAR, Politecnico di Milano, 1994.
- [24] Introduction to Interferometry, Fabio Rocca, Politecnico di Milano, ESA Radar Remote Sensing Course 2008, e-mail: rocca@elet.polimi.it
- [25] Introduction to Interferometry, ESA Radar Remote Sensing Course 2008, Ramon Hanssen, Delft University of Technology, The Netherlands, r.f.hanssen@tudelft.nl

Internetové zdroje:

- [26] Canadian Space Agency [cit. 2009-4-15],
<http://www.espace.gc.ca/asc/eng/satellites/radarsat1/default.asp>
- [27] DESCW SOFTWARE [cit. 2009-4-15], <http://earth.esa.int/descw/>

- [28] DORIS manuál [cit. 2009-4-15],
<http://enterprise.lr.tudelft.nl/doris/usermanual/dorismanual.html>
- [29] Dráhy družíc [cit. 2008-5-3], <http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs/orbits/>.
- [30] ArcGIS: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>
- [31] GoogleEarth: <http://earth.google.com/intl/cs/>
- [32] Amplitúda [cit. 2008-14-7], <http://sk.wikipedia.org/wiki/Amplit%C3%BAda>
- [33] Povodie Odry [cit. 2008-5-3], <http://www.pod.cz/>
- [34] Chyby v polohe objektov [cit. 2008-14-7],
<http://hosting.soonet.ca/eliris/remotesensing/bl130lec13.html>
- [35] DESCW Software [cit. 2008-5-3], <http://earth.esa.int/descw/>
- [36] DORIS Software [cit. 2008-5-3], <http://enterprise.lr.tudelft.nl/doris/>
- [37] Vstupné a výstupné súbory [cit. 2008-5-3], http://gisak.vsb.cz/~han19/gsarcd_e.pdf
- [38] Interferometria [cit. 2008-5-18], www.insar.cz
- [39] Fotografie povodní [cit. 2008-5-3], www.povodnefoto.cz
- [40] Český hydrometeorologický ústav [cit. 2010-2-3], http://www.chmi.cz/meteo/met_main.html
- [41] NEST manuál [cit. 2010-2-3], <http://www.array.ca/nest/tiki-index.php>
- [42] Fotografie povodní [cit. 2008-5-3], <http://www.mystika.cz/zapisky/cechy-povodne97.htm>
- [43] Definícia povodní [cit. 2008-5-3], <http://www.svp.sk/svp/default.asp?id=10&mnu=10>
- [44] Definícia SLC dát [cit. 2008-14-7], http://www.crisp.nus.edu.sg/rsat/rsat_prod.html
- [45] SAR [cit. 2008-11-8],
<http://wikipedia.org/w/index.php?title=Special%3ASearch&redirs=0&search=sar>
- [46] Radiometrické korekcie [cit. 2010-2-3],
<http://www.sazp.sk/slovak/struktura/ceev/DPZ/EDU/c441.htm>

- [47] SRTM [cit. 2008-11-8],
http://en.wikipedia.org/wiki/Shuttle_Radar_Topography_Mission
- [48] Priebeh povodní [cit. 2008-5-3], <http://povodne97.nazory.cz/doku.php?id=obecne>
- [49] Koherencia [cit. 2010-2-3], <http://sk.wikipedia.org/wiki/Koherencia>
- [50] Obežné dráhy [cit. 2008-5-3],
http://sk.wikipedia.org/wiki/Obe%C5%BE%C3%A1_dr%C3%A1ha
- [51] Družicový snímok [cit. 2010-2-3], <http://povodne97.nazory.cz/doku.php?id=druzicovy-snimek-cr-ze-dne-11.7.1997&DokuWiki=be2ca82ac241a445ef04136967100a37>

16. ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka č. 1.: Prehľad radarových záznamov použitých pri spracovaní

Tabuľka č. 2.: Súhrn procesov implementovaných v programe Doris

Tabuľka č. 3.: Základné parametre družicových snímok

Tabuľka č. 4.: Lokalizácia GPS vybraných oblastí

a ich amplitúda pre pár z 19.2.1996 a 29.4.1996

Tabuľka č. 5.: Lokalizácia GPS vybraných oblastí

a ich amplitúda pre pár z 28.8.1997 a 10.11.1997

Tabuľka č. 6.: Lokalizácia GPS vybraných oblastí

a ich amplitúda pre pár z 4.5.1998 a 8.6.1998

17. ZOZNAM OBRÁZKOV

- Obr. 1. Schéma princípu fungovania radaru*
- Obr. 2. Družice ERS-1 a ERS-2*
- Obr. 3. Zhustenie signálu*
- Obr. 4. Spätné prekrytie*
- Obr. 5. Radarový tieň*
- Obr. 6. Efekt paralaxy*
- Obr. 7. Charakteristika elektromagnetickej vlny*
- Obr. 8. Odlišný uhol snímania radaru*
- Obr. 9. Priestorová schéma základných prvkov radarového snímania terénu*
- Obr. 10. Územie nasnímané družicami ERS-1 a ERS-2*
- Obr. 11. Povodie Odry*
- Obr. 12. Oblasť postihnutá povodňami, Ostrava a okolie*
- Obr. 13. Zaplavené územie obce Jesenník nad Odrou zo dňa 6.7.1997 o 12.30 hod.*
- Obr. 14. Dáta skúmanej oblasti vo formáte SLC(track 494) zo dňa 19. 2. 1996*
- Obr. 15. Off-line verzia programu DESCW s vymedzením skúmanej oblasti (track 494)*
- Obr. 16. Prehľad tandemových dvojíc radarových snímok z roku 1996*
- Obr. 17. Prehľad tandemových dvojíc radarových snímok z roku 1997*
- Obr. 18. Prehľad tandemových dvojíc radarových snímok z roku 1998*
- Obr. 19. Postup spracovania radarových snímok*
- Obr. 20. Vstupný konfiguračný súbor pre software Doris*
- Obr. 21. Výstupný konfiguračný súbor pre software Doris*
- Obr. 22. Informácie o orbitách radarových záznamov*
- Obr. 23. Výrez dát záujmového územia zo dňa 19.2.1996, ERS-1*
- Obr. 24. Výrez pôvodnej radarovej snímky*
- Obr. 25. Simulovaná amplitúda výrezu snímky*
- Obr. 26. Koregistrácia radarových snímok*
- Obr. 27. Výsledky koregistrácie radarového záznamu, 19.2.1996, ERS-2*
- Obr. 28. Vizualizácia reziduí medzi modelom a pozorov. pri jemnej koregistrácii*
- Obr. 29. Vizualizácia reziduí medzi modelom a pozorov. v smere rozsahu a v smere azimutu*
- Obr. 30. Histogramy reziduí pre azimut a range*
- Obr. 31. Definícia preloženia medzi master a slave snímkou*
- Obr. 32. Inter. fáza vrátane "flat earth" fázy*
- 2010

- Obr. 33. Inter. fáza po odpočítaní "flat earth"
- Obr. 34. Farebná škála, ktorá predstavuje rozsah hodnôt od $-\pi$ do π
- Obr. 35. Mapa koherencie pre interferogram páru z 19.2.1996 a 29.4.1996, ERS-2
- Obr. 36. Digitálny model terénu konvertovaný do systému radaru
- Obr. 37. Model deformácii terénu vytvorený z interferometrickej fázy Obr.38. Pôvodný DEM konvertovaný do systému radaru
- Obr. 39. Rozdelenie obrazu do jednotlivých tried
- Obr. 40. Farebná škála interferometrického prúžku
- Obr. 41. Časová rada použitých snímok
- Obr. 42. Referenčná fáza interferogramu páru z 19.2. a 29.4.1996, rok pred povodňami
- Obr. 43. Referenčná fáza interferogramu páru z 28.7.1997 a 11.10.1997, počas povodní
- Obr. 44. Referenčná fáza interferogramu páru z 4.5.1998 a 8.6.1998, rok po povodni
- Obr. 45. Referenčné fázy interferogramov pre oblasť Ostrava za rok 1996, 1997 a 1998
- Obr. 46. Referenčné fázy interferogramov pre oblasť Opava za rok 1996, 1997 a 1998
- Obr. 47. Referenčné fázy interferogramov pre oblasť Karviná za rok 1996, 1997 a 1998
- Obr. 48. Časová rada pre výber interferometrických párov
- Obr. 49. Koherenčná mapa interferogramu páru z 19.2. a 29.4.1996, rok pred povodňami
- Obr. 50. Koherenčná mapa interferogramu páru z 4.5. a 8.6.1998, rok po povodniach
- Obr. 51. Koherenčná mapa interferogramu páru z 28.7. a 11.10.1997, počas povodní
- Obr. 52. Výrez koherenčnej mapy z 28.7.1997 a 11.10.1997 pre oblasť Ostravy
- Obr. 53. Tvorba zásobníka (stack) pre ďalšie spracovanie
- Obr. 54. Nastavenie parametrov pre výber vlicovacích bodov
- Obr. 55. Definovanie vlicovacích bodov
- Obr. 56. Stanovenie hodnoty amplitúdy
- Obr. 57. Informácie o geokódovanom obraze
- Obr. 58. Interferogram páru 19.2. a 29.4. 1996 situovaný v mape.
- Obr. 59. Interferogram páru 28.8. a 10.11. 1997 situovaný v mape
- Obr. 60. Koherencia interferogramu páru z 28.7. a 11.10.1997

18. ZOZNAM PRÍLOH

Príloha č. 1.: Denné úhrny zrážok v júli 1997 v povodí rieky Odry

Príloha č. 2.: Družicový snímok ČR zo dňa 11.7.1997

Príloha č. 3.: Vstupný súbor pre master snímok zo dňa 4. mája 1998

Príloha č. 4.: Fáza interferogramu tandem z 19.2.1996 a 29.4.1996, družica ERS-2

Príloha č. 5.: Fáza interferogramu tandem z 28.8.1997 a 10.11.1997, družica ERS-2

Príloha č. 6.: Fáza interferogramu tandem zo 4.5.1998 a 8.6.1998, družica ERS-2

Príloha č. 7.: CD obsahujúce spracované dáta a dokumenty

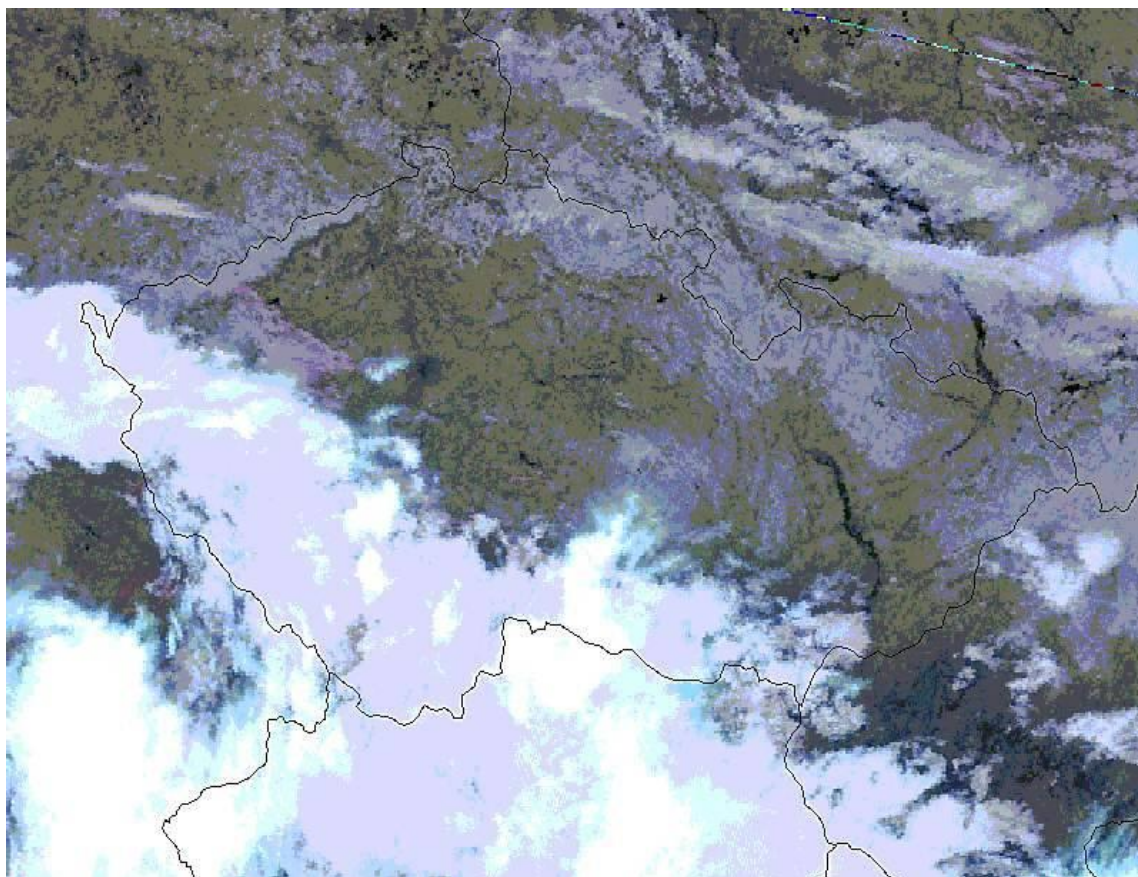
19. PRÍLOHY

Príloha č. 1. Denné úhrny zrážok v júli 1997 v povodí rieky Odry

Tab. 1a - Denní srážkové úhrny v červenci 1997 a ukazatelé predchádzajúcich srážek v povodí Odry

STANICE	4.7.	5.7.	6.7.	7.7.	8.7.	SUMA	UPS
Amultovice	6,8	53,3	118,3	60,1	20,2	258,7	24,6
Bělá p. Pradědem	15,6	101,6	156,3	130,7	34,6	438,8	39,4
Bělotín	12,7	52,4	61,3	74,4	18,2	219,0	24,7
Bílý Kříž	8,7	47,0	120,6	72,3	105,2	353,8	43,1
Bílá	6,2	24,0	108,8	60,2	91,5	290,7	45,1
Bohumín	15,0	45,0	46,0	71,2	39,0	216,2	39,1
Čeladná	14,9	67,4	190,5	73,5	77,8	424,1	41,2
Černá voda	5,1	64,2	76,4	107,2	6,8	259,7	40,6
Děhylov	14,0	53,3	68,5	86,0	45,8	267,6	28,7
Frenštát pod Radhoštěm	9,8	82,8	205,7	91,2	101,5	491,0	36,8
Fulnek	6,0	46,2	98,2	106,5	35,0	291,9	19,4
Havířov	10,8	30,8	64,4	66,6	62,3	234,9	49,1
Hefmanovice	15,8	76,1	196,5	108,9	30,2	427,5	27,4
Hnojník	17,7	72,7	63,4	55,7	70,8	280,3	32,3
Hodslavice	8,0	74,2	123,5	69,5	49,2	324,4	28,8
Horní Lomná	30,0	37,4	93,0	65,7	95,0	321,1	39,5
Hrabyně	9,5	49,5	83,5	96,1	56,2	294,8	23,4
Hradec nad Moravicí	8,1	51,2	65,0	57,5	38,0	219,8	22,4
Hukvaldy	8,8	102,8	80,2	93,9	46,3	332,0	27,6
Jeseník	29,0	88,0	189,0	167,0	39,0	512,0	29,0
Karlovice	12,1	57,1	124,2	82,3	44,7	320,4	21,9
Karviná	22,0	43,5	39,7	58,0	51,2	214,4	21,4
Klimkovice	6,6	47,5	67,7	67,4	34,6	223,8	27,4
Lubno	12,9	97,9	94,2	74,4	69,3	348,7	45,7
Lysá hora	14,7	61,0	233,8	105,2	171,0	585,7	51,3
Morávka p. př.	15,4	59,0	185,0	83,0	135,0	477,4	42,1
Mořkov	8,3	93,4	129,4	86,7	48,8	366,6	27,4
Mošnov	31,1	57,8	42,5	51,0	51,0	233,4	23,9
Mosty u Jablunkova	3,8	24,9	61,2	49,8	74,7	214,4	33,4
Nový Jičín	18,0	60,2	75,3	58,7	29,1	241,3	18,3
Nýdek	8,2	51,5	121,4	80,0	103,5	364,6	52,7
Odry	10,3	61,0	71,9	86,0	20,3	249,5	23,9
Olešná	7,3	76,6	66,7	63,6	53,6	267,8	33,0
Opava	3,4	45,7	62,0	51,5	40,7	203,3	22,3
Ostrava - Poruba	18,3	52,6	68,8	76,7	46,4	262,8	27,0
Praděd	11,0	88,0	106,2	139,0	110,0	454,2	48,8
Příbor	21,8	72,8	74,1	85,2	39,8	293,7	28,7
Ramzová	42,6	93,1	145,5	134,8	12,0	428,0	38,8
Raškovice	9,3	95,5	76,5	68,8	82,7	332,8	40,4
Rejvíz	34,0	84,0	214,0	145,0	36,0	513,0	27,7
Ropice	4,8	66,1	52,6	47,6	69,1	240,2	37,2
Staré Hamry	5,8	35,6	145,2	69,5	159,2	415,3	49,7
Šance	14,8	65,4	230,2	99,2	207,3	616,9	49,3
Skřípov	9,7	74,1	106,8	94,1	42,8	327,5	33,0
Spálov	13,3	52,9	84,5	56,5	21,2	228,4	25,5
Těšín	4,7	66,5	47,9	49,4	52,8	221,3	34,1
Třemešná	6,5	52,1	146,2	58,0	48,2	311,0	23,9
Třinec	9,5	47,0	62,0	90,0	80,0	288,5	36,7
Tyra	7,1	81,5	129,6	76,8	98,1	393,1	32,7
Uspolka (Morávka)	10,8	52,4	185,6	96,2	168,4	513,4	40,8
Vítkov	21,2	49,6	93,0	69,0	35,0	267,8	18,2
Zlaté hory	32,0	43,4	172,0	95,4	20,0	362,8	26,9
Ženklava	11,1	74,1	114,7	8,5	43,2	251,6	28,4
Průměr	13,5	62,3	110,2	80,6	63,4	-	33,1

Príloha č. 2. Družicový snímok ČR zo dňa 11.7.1997



Družicový snímok je získaný z [51].

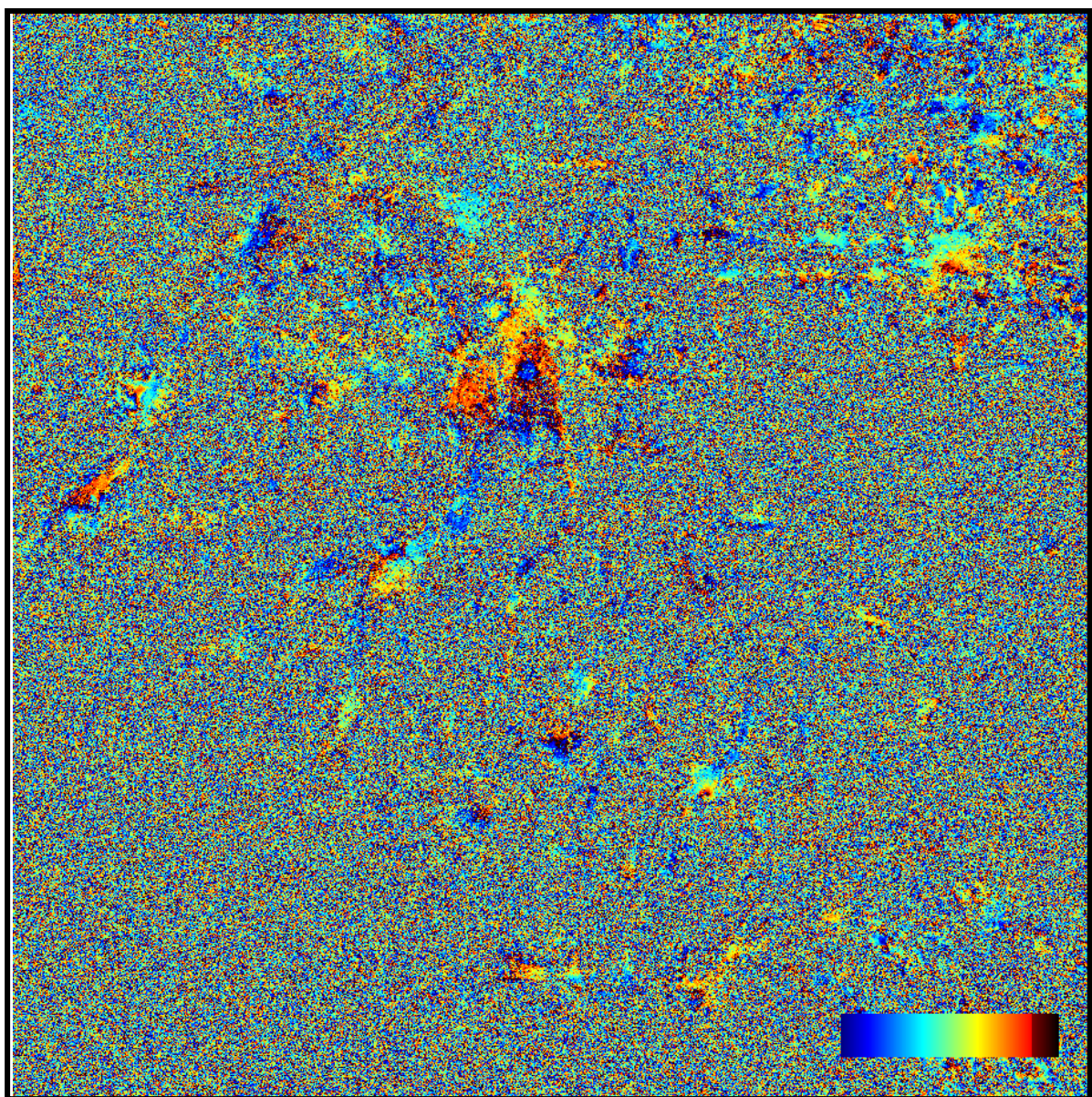
Príloha č. 3. Vstupný súbor pre master snímok zo dňa 4. mája 1998

```

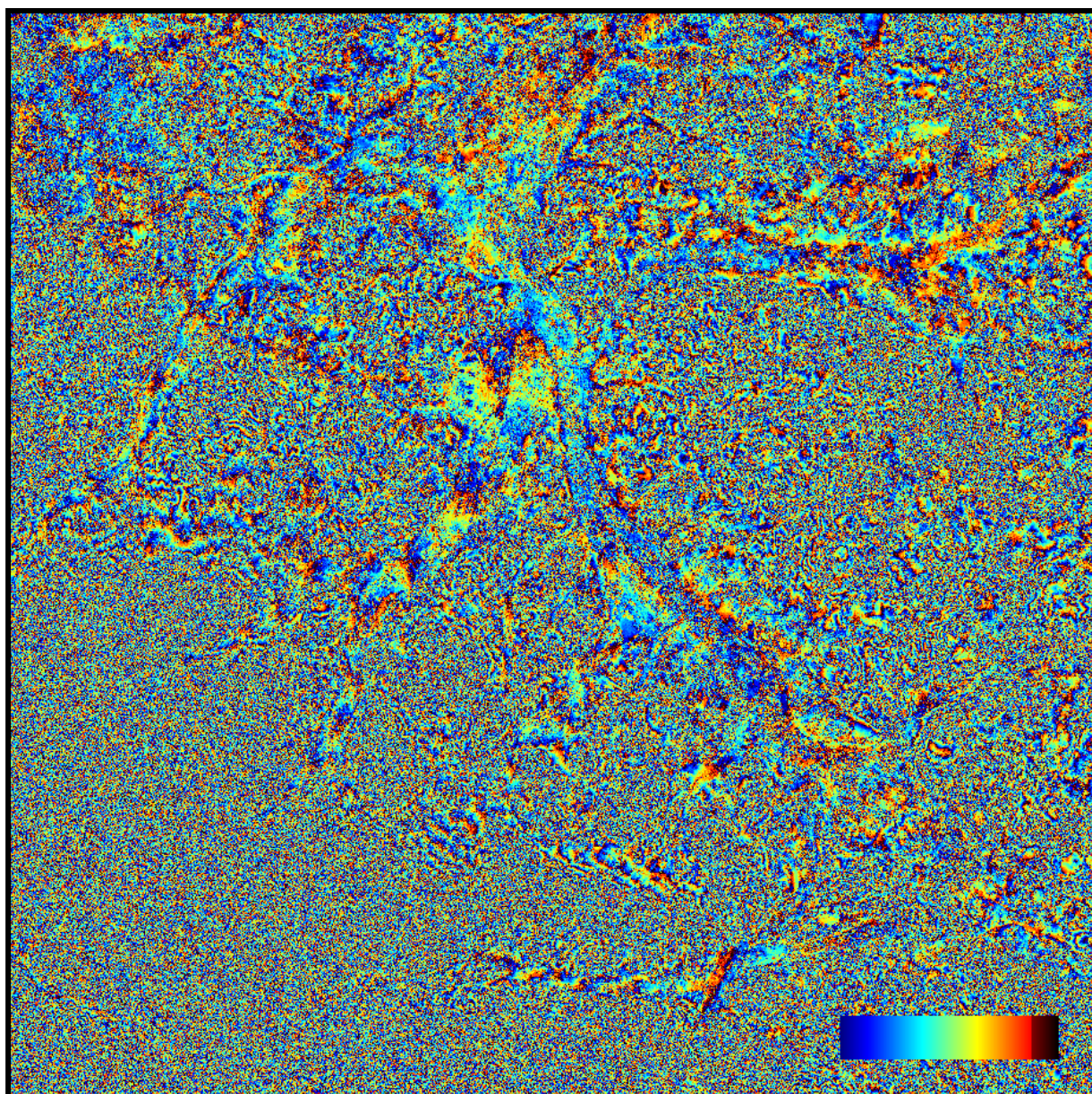
SCREEN          info                // level of output to standard out
BEEP            warning              // level of beeping
PREVIEW         on                  // SUNraster files with cpxfiddle
MEMORY          50                  // MB
OVERWRITE       ON                  // overwrite existing files
BATCH           ON                  // non-interactive
LISTINPUT       ON                  // copy this file to log
ORB_INTERP      POLYFIT 3           // 3rd degree polynomial
c DUMPBASLINE   15 10              // eval baseline on grid
c
PROCESS         m_readfiles          // reading of slc files
PROCESS         m_crop               // convert data to internal format
PROCESS         m_porbits            // get precise orbits
#
# the general io files
# -----
LOGFILE         doris.log
M_RESFILE       master.res           // parameter file
S_RESFILE       slave.res            // parameter file
I_RESFILE       interferogram.res    // parameter file
c
comment  ___ READFILES ___
c
M_IN_METHOD     ERS                  // default
M_IN_VOL        ./maj04/VDF_DAT.001  // slc volume file
M_IN_LEA        ./maj04/LEA_01.001   // slc leaderfile
M_IN_DAT        ./maj04/DAT_01.001   // slc data file
M_IN_NULL       ./maj04/NUL_DAT.001
c
comment  ___ CROP ___
c
M_CROP_IN       ./maj04/DAT_01.001
M_CROP_OUT      ./master.raw
M_DBOW_GEO      49.7089 18.2042 18500 3700 // lat_0[deg], lon_0, height, width[pix]
c
comment  ___ PORBITS ___
c
M_ORBDIR        ./odr
M_ORB_EXTRATIME 5                    // Time before first line
M_ORB_INTERVAL  4                    // Time between data
STOP                                                     // mandatory

```

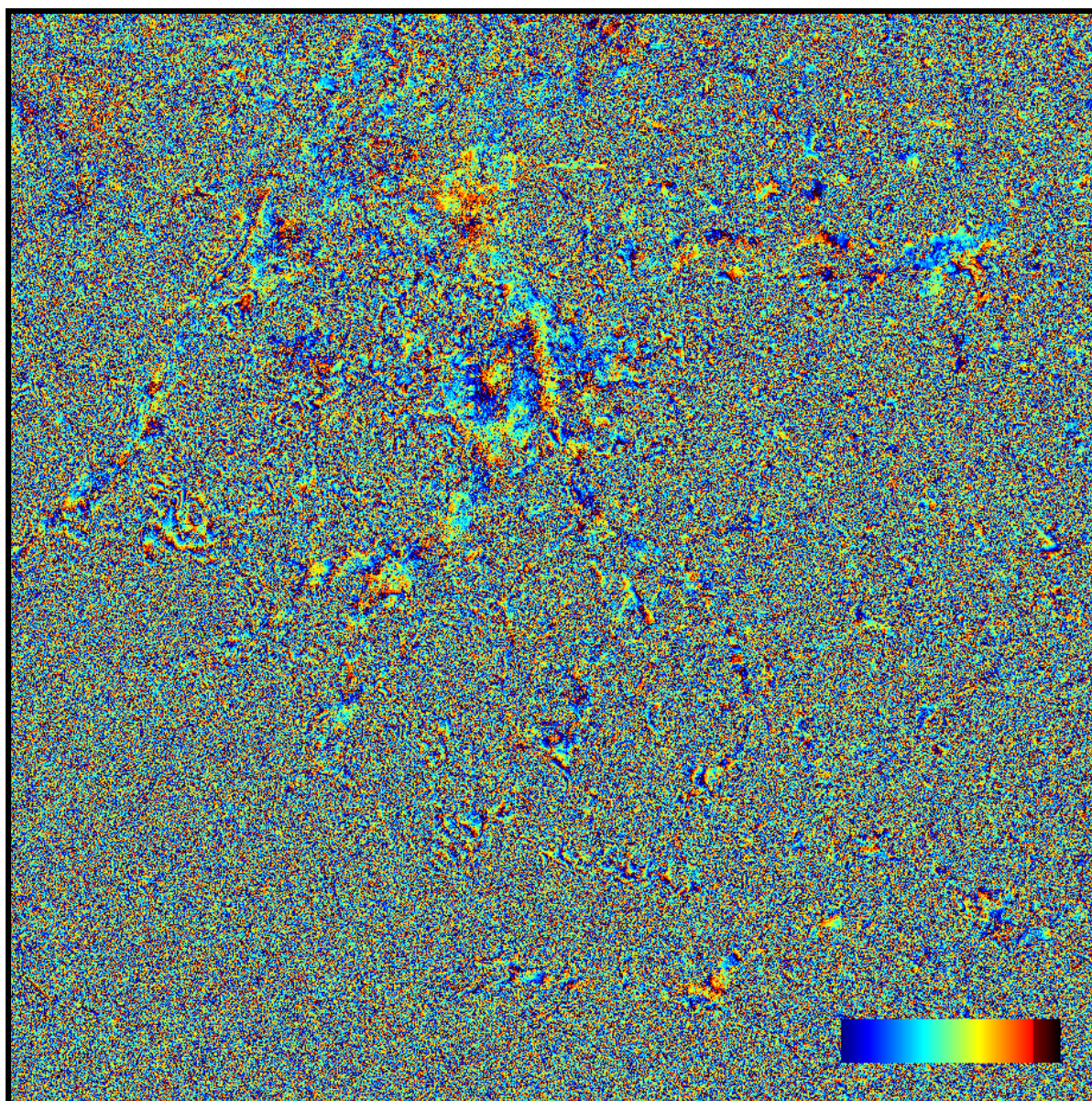

Príloha č. 4.: Fáza interferogramu páru z 19.2.1996 a 29.4.1996, družica ERS-2



Príloha č. 5.: Fáza interferogramu páru z 28.8.1997 a 10.11.1997, družica ERS-2



Príloha č. 6.: Fáza interferogramu páru zo 4.5.1998 a 8.6.1998, družica ERS-2



Príloha č. 7.: Časť súboru reziduí pre vlicovacie body

----- Band: i_slv1_ERS2_29.Apr.1996 (Parse 0) -----
 WARP coefficients:

0.20711617, 0.9996708, 4.0896342E-5,
 12.421679, 1.2778932E-4, 0.99989927,

RMS Threshold: 0.00

Valid GCPs after parse 0 :

No.	Master GCP x	Master GCP y	Slave GCP x	Slave GCP y	Row Residual	Col Residual	RMS

0	1043.000	347.000	1043.177	359.857	-0.337	-0.299	0.450
1	1739.000	347.000	1739.037	359.630	-0.022	-0.388	0.388
2	3130.000	347.000	3129.853	360.617	-0.831	-0.662	1.062
3	3826.000	347.000	3825.984	360.100	-0.225	-1.023	1.047
4	347.000	1043.000	347.800	1056.912	-1.551	-0.664	1.688
5	1739.000	1043.000	1739.395	1056.157	-0.618	-0.717	0.947
6	2435.000	1043.000	2435.349	1048.043	7.585	-0.901	7.638
7	3130.000	1043.000	3131.241	1055.047	0.669	-2.022	2.130
8	3826.000	1043.000	3826.050	1056.437	-0.632	-1.060	1.234
9	4522.000	1043.000	4522.294	1056.057	-0.163	-1.533	1.542
10	347.000	1739.000	363.968	1789.193	-37.902	-16.804	41.460
11	1739.000	1739.000	1739.164	1751.334	0.134	-0.458	0.478
12	4522.000	1739.000	4522.346	1752.102	-0.278	-1.557	1.581
13	347.000	2435.000	347.765	2448.930	-1.709	-0.572	1.802
14	1043.000	2435.000	1043.037	2447.990	-0.681	-0.074	0.685
15	1739.000	2435.000	1739.020	2441.065	6.333	-0.286	6.340
16	3130.000	2435.000	3130.802	2448.938	-1.362	-1.526	2.045
17	347.000	3130.000	347.914	3143.687	-1.536	-0.693	1.685
18	1043.000	3130.000	1042.527	3143.266	-1.026	0.465	1.127
19	1043.000	3826.000	1042.947	3839.014	-0.845	0.073	0.848
20	1739.000	3826.000	1739.536	3838.964	-0.705	-0.745	1.026
21	3130.000	3826.000	3130.964	3839.470	-1.034	-1.631	1.931
22	3826.000	3826.000	3826.105	3840.079	-1.553	-1.001	1.848
23	4522.000	3826.000	4522.448	3839.198	-0.584	-1.573	1.678
24	1043.000	4522.000	1043.065	4535.066	-0.966	-0.016	0.966
25	347.000	5218.000	348.009	5231.934	-1.994	-0.703	2.114
26	1739.000	5218.000	1739.223	5230.746	-0.627	-0.375	0.731
27	3826.000	5218.000	3826.167	5231.189	-0.804	-1.007	1.288
28	347.000	5913.000	346.290	5917.061	7.810	1.045	7.879
29	1043.000	5913.000	1043.034	5926.765	-1.805	0.071	1.807
30	1739.000	5913.000	1758.015	5884.602	40.446	-19.139	44.746

Row residual mean = 2.554757254464286E-4

Row residual std = 9.531845987253199

Col residual mean = -1.0480608258928571E-4

Col residual std = 5.12870391773925

RMS mean = 5.464642709663936

RMS std = 9.343306248553555